

ISSN 2221-3198  
e-ISSN 2686-7486

# ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

**GEOLOGY  
AND GEOPHYSICS  
OF RUSSIAN SOUTH**

**Том 11  
№ 3 / 2021**



ISSN 2221-3198  
e-ISSN 2686-7486

**Геофизический институт Владикавказского научного центра  
Российской академии наук**

# **ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ**

**GEOLOGY AND  
GEOPHYSICS  
OF RUSSIAN SOUTH**

**Том 11  
№ 3 / 2021**

**Владикавказ 2021**

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА  
«ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ»**

**Главный редактор**

д. ф.-м. н., проф. **В. Б. Заалишвили**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

**Заместитель главного редактора**

д. ф.-м. н., проф. **И. А. Керимов**, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва

**Члены редакционной коллегии**

академик РАН **В. А. Бабешко**, Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

академик РАН **А. Д. Гвишиани**, Геофизический центр РАН, г. Москва

академик РАН **М. Ч. Залиханов**, Высогогорный геофизический институт, г. Нальчик

академик АНГ **Т. Л. Челидзе**, Институт геофизики им. М. Нодия, Грузия

член-корр. НАНА **Г. Д. Етирмишли**, Республиканский Центр Сейсмологической Службы при НАНА, Азербайджан

член-корр. РАН **Д. Р. Каплунов**, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва

член-корр. НАН РА **С. М. Оганесян**, Институт геофизики и инженерной сейсмологии АН РА, Армения

член-корр. РАН **В. А. Снытко**, Институт истории естествознания и техники имени С. И. Вавилова РАН, г. Москва

член-корр. РАН **А. А. Соловьев**, Геофизический центр РАН, г. Москва

член-корр. РАН **П. Н. Шебалин**, Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

Ph. D., проф. **И. А. Береснев**, Университет штата Айова, США

д. г.-м. н., проф. **М. Г. Бергер**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

д. т. н., проф. **В. И. Голик**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

Ph. D., проф. **Ко-Лян Вэнь**, Национальный центральный университет, Тайвань

Ph. D., проф. **Г. П. Ганапати**, Центр по смягчению последствий стихийных бедствий и управлению, Технологический институт Веллуру, Индия

д. т. н., проф. **И. Д. Музаев**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

Ph. D., проф. **Т. Пападопулос**, Афинский национальный университет, Греция

д. г.-м. н., проф. **С. Г. Парада**, Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

Ph. D., проф. **А. Пинар**, Босфорский университет, Турция

д. т. н., проф. **М. В. Рыльникова**, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва

д. ф.-м. н., проф. **Ю. К. Чернов**, Северо-Кавказский государственный технический университет, г. Ставрополь

д. г.-м. н. **В. И. Черкашин**, Институт Геологии Дагестанского научного центра РАН, г. Махачкала

д. г. н. **В. А. Широкова**, Государственный университет по землеустройству, Институт истории естествознания и техники имени С. И. Вавилова РАН, г. Москва

**Ответственный секретарь**

к. т. н. **Д. А. Мельков**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

**Выпускающий редактор**

**Х. О. Чотчаев**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

*Высшей аттестационной комиссией (ВАК) журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук*

*Журнал включен в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus*

Журнал издается с 2011 года.

Периодичность издания – 4 номера в год

Учредитель:

**ВНЦ РАН**

Адрес учредителя:

362027, РСО-Алания, г. Владикавказ,

ул. Маркуса 22

Тел.: 8 (8672) 501841

e-mail: vncran@yandex.ru

http://www.vncran.ru

Издатель:

**Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук**

Адрес издателя и редакции:

362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а

Тел.: 8 (8672) 764084; факс: 8(8672) 764056

e-mail: southgeo@mail.ru

http://geosouth.ru

**ISSN 2221-3198**

**e-ISSN 2686-7486**

**Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 29119**

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

© Геофизический институт ВНЦ РАН, 2021

*Фото на обложке – Село Нар на склоне вершины Адай-Хох (4408) (К.С. Харебов)*

**EDITORIAL BOARD OF «GEOLOGY AND GEOPHYSICS  
OF RUSSIAN SOUTH» JOURNAL**

**Editor in Chief**

**Vladislav B. Zaalishvili**, Dr. Sci. (Phys.-Math.),  
Prof., Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific  
Center of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz

**Deputy Editor in Chief**

**Ibragim A. Kerimov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,  
Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS,  
Moscow

**Members of Editorial board**

**Vladimir A. Babeshko**, Academician of RAS, Southern  
Scientific Center of RAS, Rostov-on-Don  
**Alexey D. Gvishiani**, Academician of RAS, Geophysical  
Center of RAS, Moscow  
**Mikhail Ch. Zalikhhanov**, Academician of RAS, High  
Mountain Geophysical Institute, Nalchik  
**Tamaz L. Chelidze**, Academician of Georgian National  
Academy of Sciences (GNAS), M. Nodia Institute of  
Geophysics, Georgia  
**Gurban D. Yetirmishli**, Academician of Azerbaijan  
National Academy of Sciences (ANAS), Republican  
Seismic Survey Center of ANAS, Azerbaijan  
**David R. Kaplunov**, Corresponding Member of RAS,  
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral  
Resources Russian Academy of Sciences, Moscow  
**Sevada M. Hovhannisyán**, Academician of National  
Academy of Sciences of the Republic of Armenia (NAS  
RA) A. Nazarov Institute of Geophysics and Engineering  
Seismology of NAS RA, Armenia  
**Valerian A. Snyitko**, Corresponding Member of RAS,  
S.I.Vavilov Institute for the History of Science and  
Technology of RAS, Moscow  
**Anatoly A. Soloviev**, Corresponding Member of RAS,  
Geophysical Center of RAS, Moscow  
**Peter. N. Shebalin**, Corresponding Member of  
RAS, Institute of Earthquake Prediction Theory and  
Mathematical Geophysics of RAS, Moscow  
**Igor A. Beresnev**, Ph.D., Iowa State University, USA  
**Mikhail G. Berger** Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.,  
Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center of  
the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz

**Vladimir I. Golik**, Dr. Sci. (Tech.), Prof., Geophysical  
Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian  
Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russian Federation  
**Kuo-Liang Wen**, Ph. D., National Central University, Taiwan

**Ganapathy Pattukandan Ganapathy**, Ph.D, Prof.  
Centre for Disaster Mitigation and Management Vellore  
Institute of Technology, India

**Illarion D. Muzaev** Dr. Sci. (Tech.), Prof., Geophysical  
Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian  
Academy of Sciences, Vladikavkaz

**Taxiarchis Papadopoulos** Ph. D., Prof, University  
of Athens, Greece

**Sergey G. Parada** Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof., Southern  
Scientific Center of RAS, Rostov-on-Don

**Ali Pinar**, Ph. D., Prof., Boğaziçi University, Kandilli  
Observatory and Earthquake Research Institute,  
Department of Earthquake Engineering, Turkey

**Marina V. Rynnikova**, Dr. Sci. (Tech.), Prof., Institute  
of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources  
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian  
Federation

**Yuriy K. Chernov** Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., North  
Caucasus Federal University, Stavropol

**Vasily I. Cherkashin** Dr. Sci. (Geol.-Min.), Institute of  
Geology of Daghestan Scientific Centre of RAS (IG DSC  
RAS), Makhachkala

**Vera A. Shirokova** Dr. Sci. (Geog.), State University of  
Land Use Planning, S.I.Vavilov Institute for the History  
of Science and Technology of RAS, Moscow

**Executive Secretary**

**Dmitry A. Melkov**, Cand. Sci. (Tech.), Geophysical  
Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian  
Academy of Sciences, Vladikavkaz

**Managing Editor**

**Khyisa O. Chotchaev**, Geophysical Institute of  
Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy  
of Sciences, Vladikavkaz

*By the Higher Attestation Commission the Journal is included in the List of Leading Peer-reviewed Scientific Journals and Publications, in which the main scientific results of the thesis for the degree of Candidate of Science, Doctor of Science should be published.*

*The journal is included in the International Reference Database and Scopus citation System*

The Journal is published since 2011.

Frequency of publication – 4 issues per year

Founder:

**Vladikavkaz Scientific Center of RAS**

Founder address:

22, Markusa Str., Vladikavkaz, RNO-Alania,  
362027 Russia  
Tel.: +7 (8672) 501841  
e-mail: vncran@yandex.ru  
http://www.vncran.ru

Publisher:

**Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center  
of the Russian Academy of Sciences**

Publisher and Editorial address:

93a, Markova Str., Vladikavkaz, RNO-Alania, 362002 Russia  
Tel.: 8 (8672) 764084; Fax: +7 (8672) 764056  
e-mail: southgeo@mail.ru  
http://geosouth.ru

ISSN 2221-3198

e-ISSN 2686-7486

**Subscription index in the United catalog “Press of Russia” - 29119**

In the case of reproduction, a reference to the journal is obligatory.

© Geophysical Institute VSC RAS, 2021

*Cover photo – The village of Nar on the background of the Adai-Khokh peak (4408) (K.S. Kharebov)*

## СОДЕРЖАНИЕ

## ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

<b>Богущ И. А., Рябов Г. В., Бурцев А. А.</b> Колчеданы Северного Кавказа. Перспективы рудоносности Худесского месторождения.....	6
<b>Газеев В. М., Гурбанов А. Г., Кондрашов И. А.</b> Вулканы Гойтхско-Ачишхинской складчатой зоны Северо-Западного Кавказа: геохимия, геодинамическая типизация и минерогения .....	17
<b>Данилова Е. А.</b> Соляные структуры осадочного чехла Русской платформы как отражение возможных геодинамически активных очагов генерации углеводородов в фундаменте (на примере юго-запада Оренбургской области) .....	33
<b>Кондаков В. М., Мамаев С. А., Мусаев М. А., Мамаев А. С.</b> Инженерно-геологические условия северо-западной территории г. Махачкалы в связи с подтоплением.....	45

## ГЕОТЕКТНИКА И ГЕОДИНАМИКА

<b>Аптикаев Ф. Ф.</b> О вероятности превышения воздействий в строительных нормах.....	55
<b>Музаев И. Д., Харебов К. С., Музаев Н. И.</b> Механико-математическое моделирование сейсмических сдвиговых колебаний ледникового массива .....	63
<b>Свалова В. Б.</b> Сравнительная геодинамика и геотермия Альпийского и Тихоокеанского поясов. Механико-математическое моделирование.....	76

## ГЕОФИЗИКА

<b>Бергер М. Г.</b> О начальной скорости движения ледово-каменного материала, ударной воздушной волне, характере несущей среды и дальности действия взрывоподобного внезапного газодинамического выброса ледника Колка .....	93
<b>Карапетян Дж. К., Айрапетян О. Ю., Матевосян Г. М., Карапетян Р. К.</b> Сравнительный анализ динамических характеристик зданий различных типов при микросейсмических колебаниях .....	103

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ  
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

<b>Босиков И. И., Ключев Р. В., Темиров К. В., Мазко А. И.</b> Комплексная оценка параметров и закономерностей распределения благородных металлов влияющих на их продуктивность.....	115
<b>Парада С. Г.</b> Рудно-магматические системы медно-порфирирового типа Большого Кавказа.....	129

## ГЕОЭКОЛОГИЯ

<b>Алборов И. Д., Заалишвили В. Б.</b> Влияние ветрового режима и давления атмосферного воздуха на надежность вентиляции рудников и организм человека .....	148
<b>Мендебаев Т. Н., Третьяк А. Я., Смашов Н. Ж., Мохов А. В., Бурцев А. А.</b> Освоение месторождений подземных вод инжекторно-принудительным способом .....	160
<b>Реутова Н. В., Реутова Т. В., Дреева Ф. Р., Хутуев А. М.</b> Микроэлементный состав поверхностных вод бассейна реки Малка и геохимические особенности региона .....	172

## ПАМЯТЬ

<b>БЕРГЕР МИХАИЛ ГРИГОРЬЕВИЧ</b> .....	185
--	-----

## CONTENTS

## GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

<b>Bogush I. A., Ryabov G. V., Burtsev A. A.</b> Pyritic deposits of North Caucasus. Prospects of minerality of Hudes deposit.....	6
<b>Gazeev V. M., Gurbanov A. G., Kondrashov I. A.</b> Middle-Jurassic volcanites of the Goitkhsko-Achishkinsk folded zone of North-Western Caucasus: geochemistry, geodynamical typification and minerageny .....	17
<b>Danilova E. A.</b> Salt structures of the sedimentary cover of the Russian platform as a reflection of possible geodynamically active foci of hydrocarbon generation in the basement (on the example of the south-west of the Orenburg region) .....	33
<b>Kondakov V. M., Mamaev S. A., Musaev M. A., Mamaev A. S.</b> Engineering and geological conditions of the north-western territory of Makhachkala due to flooding.....	45

## GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

<b>Aptikaev F. F.</b> An exceedance probability of the influence in the Building Code .....	55
<b>Muzaev I. D., Harebov K. S., Muzaev N. I.</b> Mechanical and mathematical modeling of seismic shear vibrations of a glacial massif.....	63
<b>Svalova V. B.</b> Comparative geodynamics and geothermy of the Alpine and Pacific belts. Mechanical- mathematical modeling.....	76

## GEOPHYSICS

<b>Berger M. G.</b> On the initial velocity of the glacial-stone material movement, the air-blast, the nature of the carrier medium and the range of action of sudden explosion-like gas-dynamic surge of the Kolka glacier .....	93
<b>Karapetyan J. K., Hayrapetyan H. Yu., Matevosyan G. M., Karapetyan R. K.</b> Comparative analysis of the dynamic characteristics of various types of buildings during microseismic vibrations.....	103

## GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

<b>Bosikov I. I., Klyuev R. V., Temirov K. V., Mazko A. I.</b> Comprehensive assessment of parameters and regularities of the distribution of precious metals affecting their productivity .....	115
<b>Parada S. G.</b> Ore-magmatic systems of the copper-porphyry type of the Greater Caucasus.....	129

## GEOECOLOGY

<b>Alborov I. D., Zaalishvili V. B.</b> Influence of wind conditions and pressure the influence of atmospheric air on the reliability of mine ventilation and the human body .....	148
<b>Mendebaev T. N., Tretyak A. Y., Smashov N. Z., Mokhov A. V., Burcev A. A.</b> Groundwater deposits development by the injector-forced method.....	160
<b>Reutova N. V., Reutova T. V., Dreeva F. R., Khutuev A. M.</b> Microelements in the surface waters of the Malka River basin and geochemical features of the region.....	172

## MEMORY

<b>BERGER MIKHAIL GRIGORIEVICH</b> .....	185
--	-----

## ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 553.435 (470.6)

DOI: [10.46698/VNC.2021.80.87.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.80.87.001)

Оригинальная статья

## Колчеданы Северного Кавказа. Перспективы рудоносности Худесского месторождения

И. А. Богуш , Г. В. Рябов , А. А. Бурцев 

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
им. М. И. Платова, Россия, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск,  
ул. Просвещения, 132, e-mail: georg.riabov@yandex.ru

Статья поступила: 02.08.2021, доработана: 24.08.2021, принята к публикации: 31.08.2021

**Резюме:** Актуальность работы заключается в изучении и обосновании перспектив выявления новых рудных тел в слабо изученных частях рудного поля. Рассмотрены геологические особенности крупного Худесского медноколчеданного месторождения Северного Кавказа. Рудные залежи месторождения разведаны и локализованы только в восточной части рудного поля. Центральная часть и западный фланг поля практически не разведаны, хотя здесь сохраняется полный рудоносный разрез и выделена мощная Северная зона пиритизированных метасоматитов. Месторождение планируется Уральской горнорудной компанией в ближайшие годы ввести в промышленную разработку (ведется разработка технического проекта). **Целью проведенных исследований** являлось составление схемы разреза продуктивной части девонской вулканической постройки со стратиграфическими уровнями рудных залежей гидротермально-осадочных руд и установление прямых признаков скрытого оруденения. **Методы работы.** В процессе проведения полевых работ выполнено подробное описание этих крупнообломочных плотных пород, состоящих из обломков глыб вулкаников и кластогенно-гидротермального мелкообломочного цемента с редкими (1%) обломками массивных колчеданных руд и пиритизированных метасоматитов. **Результатом работ** явилось обоснование в качестве главного поискового признака наличия обломков массивных руд в секущих телах эксплозивных брекчий, указывающих на скрытое промышленное оруденение. Доказывается поствулканический характер этих рудоносных эксплозивных брекчий. Рекомендуется направление поисковых работ. Поисковые буровые скважины при прослеживании и выявлении стратиграфических рудных уровней нужно располагать по субмеридиональным профилям. В существующей штольне №19 следует пройти в северном направлении разведочные квершлагы с учётом секущего вертикального положения поствулканических тел эксплозивных брекчий. Учитывая связь нижнепермского вулканизма с золотоносным Северным разломом Тырнауз-Пшекишской тектонической зоны, близость и геологическое единство Чучурского и Худесского месторождений, следует провести опробование эксплозивных брекчий на комплекс полиметаллов, включая золото.

**Ключевые слова:** Северный Кавказ, медноколчеданные месторождения, Худесское рудное поле, эксплозивные брекчий, поисковые критерии.

**Для цитирования:** Богуш И. А., Рябов Г. В., Бурцев А. А. Колчеданы Северного Кавказа. Перспективы рудоносности Худесского месторождения. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (3): 6 – 16. DOI: 10.46698/VNC.2021.80.87.001.

[DOI: 10.46698/VNC.2021.80.87.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.80.87.001)

Original paper

## Pyritic deposits of North Caucasus. Prospects of minerality of Hudes deposit

I. A. Bogush , G. V. Ryabov , A. A. Burtsev 

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132 Prosveshcheniya,  
Novocherkassk 346428, Russian Federation, e-mail: georg.riabov@yandex.ru

Received: 02.08.2021, revised: 24.08.2021, accepted: 31.08.2021

**Abstract: The relevance of the work** is to study and substantiate the prospects for identifying new ore bodies in poorly studied parts of the ore field. The geological features of the large Khudessky copper-crusted deposit of the North Caucasus are considered. The ore deposits of the deposit have been explored and localized only in the eastern part of the ore field. The central part and the western flank of the field are practically not explored, although a complete ore-bearing section is preserved here and a powerful Northern zone of pyritizedmetasomatites is identified. The deposit is planned to be put into commercial development by the Ural Mining Company in the coming years (a technical project is being developed). **The aim of the research** was to draw up a section diagram of the productive part of the Devonian volcanic structure with stratigraphic levels of ore deposits of hydrothermal-sedimentary ores and to establish direct signs of hidden mineralization. **Methods.** In the course of field work, a detailed description of these large-block dense rocks consisting of fragments of blocks of volcanites and clastogenic-hydrothermal small-block cement with rare (1%) fragments of massive pyrite ores and pyritizedmetasomatites was performed. **The results of the work** were the substantiation as the main search sign of the presence of fragments of massive ores in the secant bodies of explosive breccias, indicating hidden industrial mineralization. The post-volcanic character of these ore-bearing explosive breccias is proved. The direction of search operations is recommended. Prospecting drilling wells should be located along submeridional profiles when tracing and identifying stratigraphic ore levels. In the existing tunnel No. 19, it is necessary to pass exploration quershlags in the northern direction, taking into account the secant vertical position of the post-volcanic bodies of explosive breccias. Taking into account the connection of the Lower Permian volcanism with the gold-bearing Northern fault of the Tyrnyauz-Przekish tectonic zone, the proximity and geological unity of the Chuchkur and Khudessky deposits, it is necessary to test explosive breccias for a complex of polymetals, including gold.

**Keywords:** North Caucasus, copper pyrite deposits, Khudesskoe ore field, explosive breccias, search criteria.

**For citation:** Bogush I.A., Ryabov G.V., Burtsev A.A. Pyritic deposits of North Caucasus. Prospects of minerality of Hudes deposit. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (3): 6 – 16. DOI: 10.46698/VNC.2021.80.87.001.

### Введение

Медноколчеданные месторождения Северного Кавказа эксплуатируются с 60-х годов прошлого столетия и являются главным рудным промышленным объектом региона. На западном фланге 200-километровой колчеданоносной полосы расположено Урупское медноколчеданное месторождение, дающее стране медь, золото и примесную платину [Колчеданные месторождения..., 1973]. Кроме него, в Лабино-Урупском горнопромышленном центре сосредоточено еще шесть промышленных колчеданных залежей, запасов которых хватит на 50-60 лет.

Второй рудный центр Северного Кавказа расположен в Северном Приэльбрусье, где практически в едином рудном поле расположены Худесское медно-кобаль-



товое и крупное Чучкурское золоторудное месторождения [Богуш и др., 2020; Колчеданные месторождения..., 1973]. Разработка этих месторождений в ближайшее время диктуется экономическими и социальными интересами Кавказского региона. Крупнейшее на Кавказе по рудной массе Худесское медноколчеданное месторождение Северного Приэльбрусья занимает участок глубинной Тырныауз-Пшекишской шовной зоны [Скрипченко, 1972; Скрипченко, Тамбиев, 2000; Парада и др., 2019]. На отработку этого месторождения выдана лицензия. Однако разработка медноколчеданного кобальтоносного месторождения задерживается в связи с логистическими и технологическими трудностями. Рекомендации по перспективам увеличения запасов этого месторождения могут ускорить его эксплуатацию.

### Методика исследований

Худесское месторождение и рудное поле исследовалось нами с 70-х годов прошлого века путем геологического картирования масштаба 1:2000-1:5000 восточного и западного его флангов, а также участия в его разведке и подсчёте запасов руды и металлов. В процессе разведки месторождения производилась документация подземных горных выработок и керна буровых скважин. Полевые работы сопровождались минералогическими, петрографическими, геохимическими и минераграфическими исследованиями руд и пород. Составлено 5 карт рудного поля и месторождения, выполнены сотни аналитических исследований, написано 8 производственных отчётов.

### Худесское рудное поле

Сочетание структурных и геоморфологических элементов Худесского рудного поля даёт возможность наблюдать естественный продольный разрез крупной вулканической раннегерцинской постройки протяжённостью 23 км и шириной выхода вулканитов 1-2,5 км. Мощность вулканитов достигает 2000 м в центре вулкана и резко сокращается на флангах до 129-200 м. Рудное поле связано исключительно с плоским вулканом щитового типа. Гидротермально-осадочное медноколчеданное оруденение за пределами палеовулканической постройки по всей полосе кизилкольской свиты (D<sub>2-3</sub>ks) отсутствует [Геология СССР, 1968]. В Худесском палеовулкане, несмотря на его чёткую обособленность в палеорельефе, отсутствуют признаки вулканизма центрального типа. Специфической особенностью вулканизма является ареальный характер извержений [Скрипченко, Тамбиев, 2000]. Излияние базальтоидных вулканитов в придонных подводных условиях происходило из многочисленных трещинных аппаратов, формировавших стратифицированные пластовые тела и горизонты подушечных (шаровых) лав [Скрипченко, 1966, 1972; Скрипченко, Тамбиев, 2000].

Кизилкольская свита девонской офиолитовой толщи Северного Кавказа сложена последовательно дифференцированной базальт-риолитовой формацей [Колчеданные месторождения..., 1973]. В составе свиты выделяются покровы и линзовидные тела базальтов, андезитов-базальтов, андезитов, андезитов-дацитов, дацитов, переслаивающихся с туфами, туфобрекчиями, кремнистыми туфитами. В центральной части палеовулкана субширотная полоса девонских вулканитов пересекается мощным (до 200-250 м) вертикальным телом нижнепермских лейкократовых плагиигранитов хребта «Гранитный».

Рудное поле, совпадающее с центральной частью Худесской вулканической постройки, выделяется: 1 – максимальной мощностью и полнотой разреза вулканитов;

2 – фаціальным різнобразієм вулканітів; 3 – максимальним розвитком магмовиводящих порід субвулканічної і жерлової фаций; 4 – наявністю потужних тел шарових лав; 5 – концентрацією малих інтрузій і жильних поствулканічних магматических дайкових порід; 6 – промислової концентрації і фацияльної повнотою гідротермально-осадочного колчеданного орудення; 7 – наявністю потужних зон сульфідизованих метасоматитів; 8 – сочетанієм генетически різнобразної син- і поствулканіческої сульфідної (колчеданної) мінералізації. Комплекс геологічесеских особенностей Худесеского рудного поля слудует рассматривать как однозначный поісковый критерій колчеданного орудення в вулканітах кизилкольської світи.

Медноколчеданное оруденение Худесеского рудного поля сосредоточено в пределах нижней базальтоидной половины разреза кизилкольской світи в виде стратифицированных рудных залежей – Северной, Промежуточной, Центральной и Кизилкольской (рис. 1). Последние две зоны имеют общий стратиграфический уровень.

В разрезе колчеданоносной кизилкольской світи базальт-андезит-дацитового состава Н.С. Скрипченко выделены две толщи: нижняя – спилитовая (базальтоидная) и верхняя – андезитовая [Скрипченко, 1966, 1972]. Колчеданное оруденение затрагивает нижнюю (спилитовую) толщу и не обнаружено в верхней андезитовой толще. Продуктивная спилитовая толща базальтоидных вулканітов описана нами в разрезе центральной части Худесеского палеовулкана на пересечении по ручью Конушкол (рис. 1). Представленный опорный разрез обобщает по вертикали около 1 км мощно-

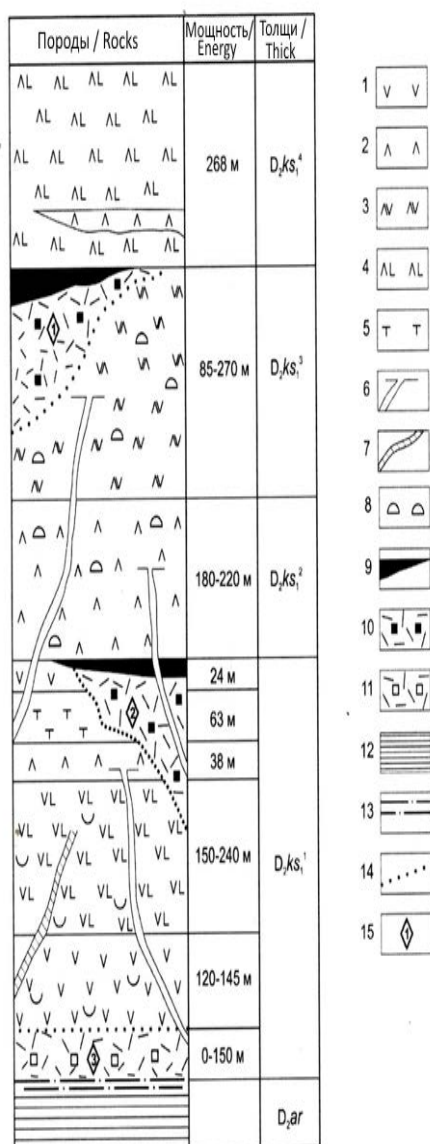


Рис. 1. Разрез нижней, продуктивной, половины кизилкольской світи. Условные обозначения: 1 – базальты; 2 – андезиты; 3 – андезито-базальты; 4 – андезито-дациты; 5 – туфы и вулканічесеские брекчии; 6 – магмовыводящие каналы; 7 – габбро; 8 – подушечная отдельность лав; 9 – колчеданные руды; 10 – околорудные сульфидизованные метасоматиты; 11 – метасоматиты; 12 – филлиты; 13 – тектоническая зона; 14 – контакты постепенные; 15 – рудные зоны (1 – Главная, 2 – Промежуточная, 3 – Северная) /

Fig. 1. Section of the lower productive half of the Kizilkol suite. Legend: 1 – basalts; 2 – andesites; 3 – andesite-basalts; 4 – andesite-dacite; 5 – tuffs and volcanic breccias; 6 – magma effluent channels; 7 – gabbro; 8 – pillow structure of lavas; 9 – pyritic ores; 10 – circum-ore sulphidized metasomatites; 11 – metasomatites; 12 – phyllites; 13 – tectonic zone; 14 – gradual contacts; 15 – ore zones (1 – Main, 2 – Intermediate, 3 – North)

сти основания кизилкольской свиты и состоит из четырёх горизонтов. В опорном разрезе отчётливо выделяется две пачки вулканитов, сохраняющих одинаковую го-модромную эволюцию – базальт-андезито-базальт-андезит (андезито-дацит). Эти толщи равновеликие по мощности и разделены 120-тиметровой пачкой пород пё-строго фациального состава с чередованием пластовых тел андезитов-базальтов, ба-зальтов, вулканических брекчий и туфов (рис. 1).

Разведанные колчеданные залежи (Главная, Промежуточная и Кизилкольская) располагаются в восточной части рудного поля (рис. 1) [Скрипченко, 1966]. Здесь имеются выходы на поверхность Главной залежи и сосредоточены разведочные вы-работки – 17 штолен и более 120 буровых скважин. Центральная часть и западный фланг практически не разведаны, хотя здесь сохраняется полный рудоносный раз-рез и выделена мощная Северная зона пиритизированных метасоматитов. Прямым поисковым признаком скрытого промышленного оруденения на западной половине рудного поля являются выходы рудоносных эксплозивных брекчий [Богуш, Гонча-рова, 1970; Иванкин, 1962; Смирнов, 1982; Яковлев и др., 1965].

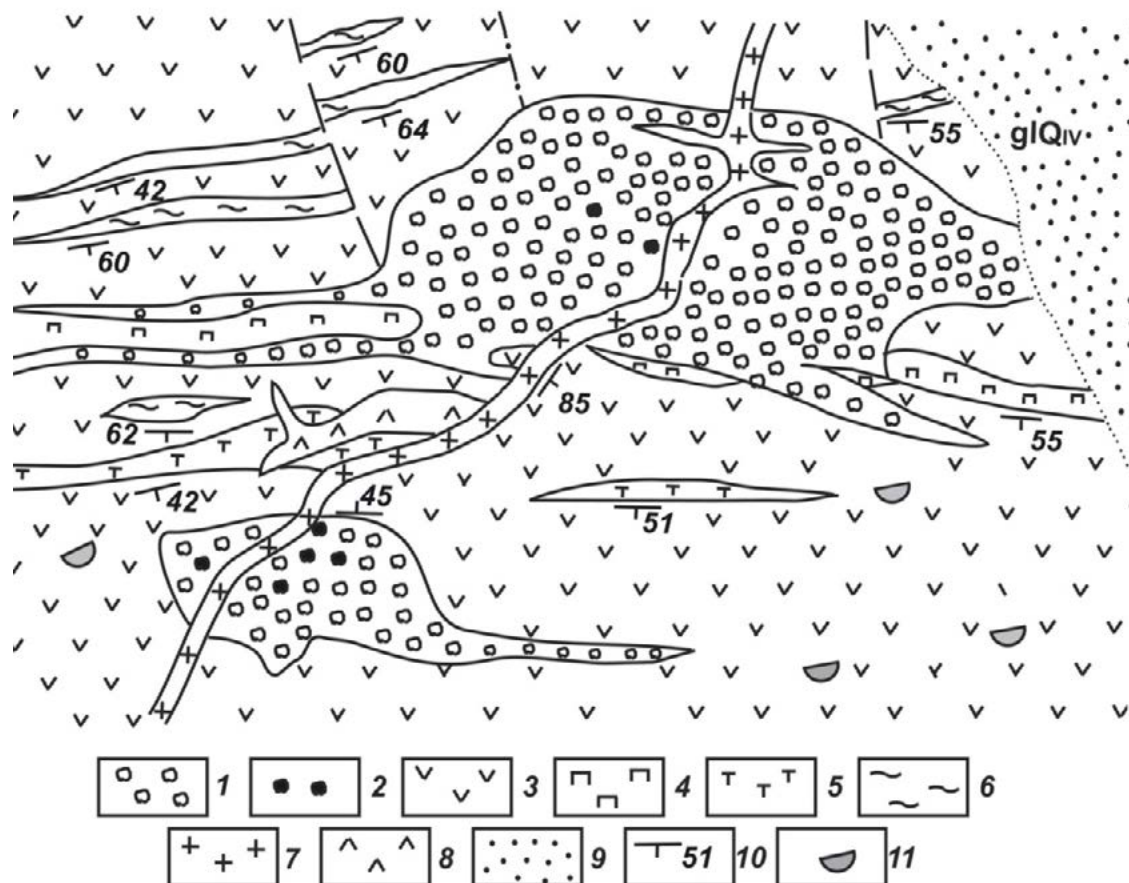


Рис. 2. Трубообразные тела эксплозивных брекчий. Условные обозначения: 1 – брекчий; 2 – рудные обломки; 3 – андезиты, андезитов-базальты; 4 – пироксеновые базальты; 5 – туфы; 6 – яшмоиды; 7 – аплитовидные граниты; 8 – диабазы; 9 – моренные отложения; 10 – элементы залегания пород; 11 – ориентировка подушечных лав /

Fig. 2. Pipelike bodies of explosive breccias. Legend: 1 – breccias; 2 – ore fragments; 3 – andesites, andesite-basalts; 4 – pyroxene basalts; 5 – tuffs; 6 – jasperoids; 7 – aplite-like granites; 8 – diabases; 9 – morainic deposits; 10 – elements of bedding of rocks; 11 – orientation of pillow lavas

### Эксплозивные рудоносные брекчии

Рудоносные exploзивные брекчии в единичном проявлении встречены в ущелье балки Кривой, где они в виде сближенных крупных тел прорывают вулканы верхней половины кизилкольской свиты. Секущие трубообразные тела брекчий имеют овальную форму, длинные оси тел ориентированы согласно слоистости вмещающих вулканитов (рис. 2). По периферии тел отмечаются секущие и согласные межпластовые линейные апофизы exploзивных брекчий. Два сближенных трубообразных тела exploзивных брекчий имеют в плане размеры 360'142 м и 148'72 м и занимают субвертикальное положение в дислоцированных вулканитах (D<sub>2-3</sub>ks) (рис. 3). По центру тела брекчий пересекаются субвертикальной дайкой лейкократовых плагиогранитов, аналогичных крупному секущему интрузиву пермских гранитов хребта Гранитного в центре Худесского палеовулкана [Скрипченко, 1966].

Эксплозивные брекчии представляют собой крупнообломочные плотные породы, состоящие из обломков глыб вулканитов и кластогенно-гидротермального мелкообломочного цемента с редкими (1%) обломками массивных колчеданных руд и пиритизированных метасоматитов [Богущ, Гончарова, 1970]. Обломки брекчий имеют округлую, изометричную или несколько удлинённую форму. Размеры обломков изменяются от 1-2 см до 35-42 см; преобладают обломки размерностью 5-12 см в поперечнике (70-80% объёма). Мелкообломочный материал (менее 1 см) достаточно контрастно отличается по размеру от массы обломков и может быть отнесён к цементу. В гранулометрическом составе брекчий преобладают типы с количественным господством мелкообломочного магматического цементирующего материала.

Крупные обломки брекчий представлены риолитами, андезитами, дацитами, кремнистыми породами (яшмоиды). В небольших количествах (менее 1%) обнаруживаются обломки колчеданных руд и кварц-серицитовых пиритизированных метасоматитов. Цемент exploзивных брекчий в основном кластический и редко магматический. Кластический агрегат представлен мелкими (0,05-8,0 мм) остроугольными обломками пород и минералов, заключённых в кварц-альбит-хлоритовый, кварц-альбит-гематитовый базис. Лавовый цемент брекчий характеризуется заметной флюидалностью и буровой и зеленоватой окраской за счёт обогащения гематитом и хлоритом. В отдельных случаях наблюдаются газовые пустоты (миндалины).

В разных частях тел exploзивных брекчий (рис. 2) обнаружены обломки (рудокласты) массивных медноколчеданных руд, аналогов руд колчеданных залежей. Рудные обломки сложены тонко-микрзернистой массивной медноколчеданной рудой. Форма обломков округлая, несколько удлинённая, иногда полигональная с пригнутыми выступами и углами. Размеры рудных обломков изменяются в пределах 6-40 см по длинной оси; наиболее распространены обломки 10-20 см. Контакты обломков чёткие, ровные, без апофиз, подводящих каналов и ореолов пиритизации вокруг них. По размерам и форме рудные обломки соответствуют обломкам пород брекчии. Максимальная частота встречаемости рудных обломков 1-2 на 1 м<sup>2</sup>; обычно это одиночные находки в различных частях тел брекчий и их апофиз (рис. 2). Минеральный состав рудокластов следующий (%): пирит 40-78, кварц 18-45, халькопирит 1-20, гематит 1-3. Гипергенные минералы представлены гидроокислами железа, халькозином, ковеллином, малахитом. Рудные обломки имеют аллотриоморфнозернистую, гипидиоморфнозернистую и метаколлоидную структуры.

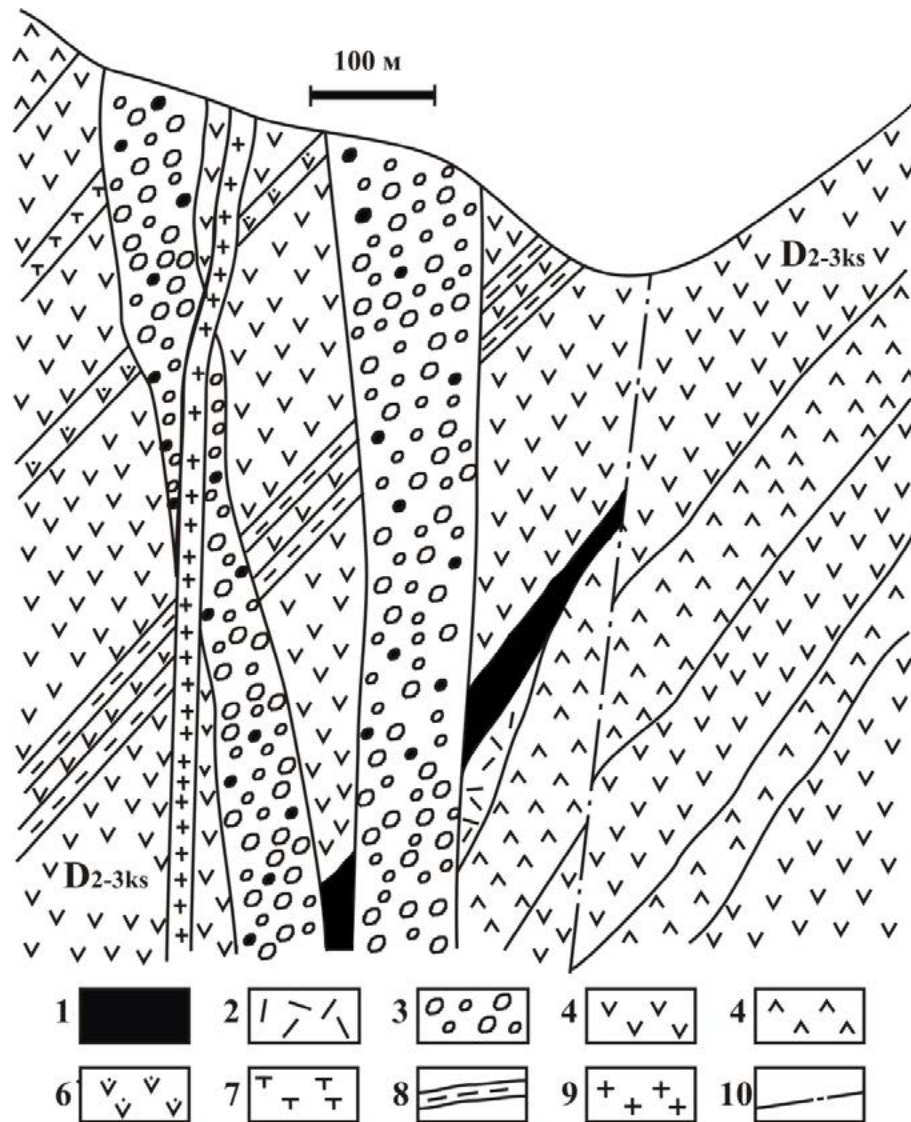


Рис. 3. Прогнозный разрез рудной залежи и рудоносных брекчий. Условные обозначения: 1 – массивный колчедан; 2 – пиритизированные метасоматиты; 3 – рудоносные взрывные брекчии; 4 – андезиты, андезито-базальты; 5 – андезито-дациты; 6 – пироксеновые базальты; 7 – туфы; 8 – кремнистые туффиты (яшмоиды); 9 – плагиограниты; 10 – тектонические нарушения /

Fig. 3. Forecast section of ore deposit and ore-bearing breccias. Legend: 1 – massive pyrite; 2 – pyritized metasomatites; 3 – ore-bearing explosive breccias; 4 – andesites, andesite-basalts; 5 – andesite-dacite; 6 – pyroxene basalts; 7 – tuffs; 8 – siliceous tuffites (jasperoids); 9 – plagiogranites; 10 – tectonic disturbances

Отдельные структурные элементы руд часто срезаются границами обломков. По своим структурным особенностям и составу рудные обломки аналогичны гидротермально-осадочным тонкозернистым сплошным рудам Главной и Промежуточной залежей Худесского месторождения [Рябов и др., 2012; Богуш и др., 2020]. Отличительной особенностью рудокластов является значительное окварцевание и отсутствие тонкодисперсных дисульфидов железа (гель-пирита). Импрегнация кварцем характерна для всего массива взрывных брекчий и связана с автотетраформизмом их тел.

## Результаты работы и их обсуждение

Находка обломков сплошных руд Н.С. Скрипченко [1966] при съёмочных работах М 1:10000 позволила определить вмещающие породы в качестве вулканических конглобрекчий, стратифицированных согласно слоистости вулканогенной толщи. Согласно такой позиции, залежи массивных руд размывались, а их обломки (рудные гальки) переносились вместе с обломками вулканитов по латерали, по поверхности тел вулканитов. С учётом осадочных позиций рудоносных брекчий и их пластового наклонного залегания была задана поисковая штольня № 19, которая не дала положительных результатов. Более поздние работы (геологическая съёмка М 1:2000) и дополнительные исследования брекчий И.А. Богушем и Т.Я. Гончаровой [1970] позволили отнести рудоносные брекчии к поствулканическим взрывным образованиям. Вертикальные трубообразные взрывные тела этих брекчий, пересекая рудные тела залежей медноколчеданных руд, захватывали фрагменты колчеданных залежей и выносили их в верхние горизонты рудного поля (рис. 2, 3). Наличие рудокласт массивных колчеданных руд в секущих продуктивных вулканитовых телах взрывных брекчий однозначно свидетельствуют о наличии скрытых тел промышленных руд [Бортников, Викентьев, 2004; De Rao, Van Staal, 2003; Large et al., 2001; Scott, 1983]. В связи с важным поисковым критерием, возникает вопрос о возрасте взрывных брекчий и связи их с кизилкольским вулканизмом.

Субвертикальные тела взрывных брекчий секут уже дислоцированные раннегерцинским тектоногенезом ( $C_2$ ) девонские вулканиты. Этот факт определяет поствулканический характер взрывных брекчий. По оси двух сближенных тел брекчий следует дайка лейкократовых плагиогранитов. Налицо единый тектонический контроль брекчий и гранитов. Крупное секущее тело гранитов уже имеется в пределах Худесского рудного поля [Скрипченко, 1966]. Жильные тела и малые интрузии плагиогранитов достаточно часто встречаются в палеозойских толщах Северного Кавказа [Геология СССР, 1968; Колчеданные месторождения..., 1973], возраст их определяется как нижнепермский. Жильные граниты проявляют себя как дериваты платформенных андезито-дацитовых и дацитовых позднегерцинских вулканов нижней перми. Такие тела гранитов присутствуют в девонской полосе соседнего Чучкурского рудного поля. Кислые магматические тела этого рудного поля несут благороднометалльное (Au, Pt, Pd) оруденение и располагаются вертикально [Богуш и др., 2020]. Вышеприведённые факты определяют возраст взрывных брекчий как позднегерцинский, а именно раннепермский.

## Выводы

1. Прямым поисковым признаком скрытого промышленного оруденения в западной, слабо разведанной, части Худесского рудного поля являются выходы рудоносных взрывных брекчий, содержащих рудокласт массивных колчеданных руд.

2. Залежи медноколчеданных руд Худесского рудного поля и остальных колчеданных месторождений Северного Кавказа в генетическом плане относятся к гидротермально-осадочным. Как показала мировая практика, эти руды в толщах вулканитов относятся исключительно к стратиформным [Бортников, Викентьев, 2004; Масленников, 2006; Рудные месторождения СССР, 1978; Скрипченко, 1966, 1972; Koski et al., 1985; Large et al., 2001; Solomon et al., 2002; Zierenberg, 1986] и располагаются согласно слоистости вмещающих вулканитов. Как показала разведка

Худесского месторождения, Главная и Промежуточная стратиформные колчеданные залежи вытянуты в субширотном направлении согласно простирацию полосы кизилкольской свиты. По этой причине разрезы поисковых буровых скважин при прослеживании и выявлении стратиграфических рудных уровней нужно располагать субмеридионально. В пройденной штольне № 19 следует пройти разведочные квершлагги с учётом секущего вертикального положения поствулканических тел взрывчатых брекчий в северном направлении.

3. Учитывая связь нижнепермского вулканизма с золотоносным Северным разломом Тырнауз-Пшекишской тектонической зоны [Богуш и др., 2020], близость и геологическое единство Чучкурского и Худесского месторождений, следует провести опробование взрывчатых брекчий на комплекс полиметаллов.

### Литература

1. Богуш И. А., Гончарова Т. Я. Взрывчатые брекчии Худесского медноколчеданного месторождения на Северном Кавказе. // Доклады АН СССР. – 1970. – Т. 191. №4. – С. 881-884.
2. Богуш И. А., Рябов Г. В., Черкашин В. И. Генезис и рудоносные структуры Чучкурского месторождения благородных металлов Северного Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – № 10 (1). – С. 81-95. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59067
3. Бортников Н. С., Викентьев И. В. Современное минералообразование в мировом океане. // Проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии. – М.: ИГЕМ РАН, 2004. – С. 325-355.
4. Геология СССР. Т. 1X. Северный Кавказ. Ч. 1. Геологическое описание. – М.: Недра, 1968. – 759 с.
5. Иванкин П. Ф. О происхождении минерализованных брекчий некоторых месторождений колчеданного типа Алтая и Урала. // Доклады АН СССР. – 1962. – № 142 (2). – С. 422-424.
6. Колчеданные месторождения Большого Кавказа. – М.: Недра, 1973. – С. 7-140.
7. Масленников В. В. Литогенез и колчеданообразование. – Миасс: Ин-т минералогии УРО РАН, 2006. – 384 с.
8. Парада С. Г., Маркин М. Ю., Столяров В. В., Чотчаев Х. О. Сопоставление химико-аналитических и геологических данных по золотоносным интервалам буровых скважин в пределах Зыгыркольской зоны Тырнаузского рудного поля. // Геология и Геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9 (2). – С. 56-68. DOI:10.23671/VNC.2019.2.31977.
9. Рудные месторождения СССР. В 3-х томах. / Под ред. акад. В. И. Смирнова. – М.: Недра, 1978. – 399 с.
10. Рябов Г. В., Богуш И. А. Типизация колчеданных месторождений Северного Кавказа. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2012. – № 5. – С. 88-91.
11. Скрипченко Н. С. Вулканогенно-осадочное рудообразование (на примере колчеданных месторождений Северного Кавказа). – М.: Недра, 1966. – 292 с.
12. Скрипченко Н. С. Гидротермально-осадочные сульфидные руды базальтоидных формаций. – М.: Недра, 1972. – 216 с.
13. Скрипченко Н. С., Тамбиев А. С. Вулканыты и рудоносность девонского базальтового пояса Северного Кавказа. // Геология и минерально-сырьевая база Северного Кавказа. Мат. IX Междунар. конф. – Ессентуки. – 2000. – С. 613-628.
14. Смирнов В. И. Геология полезных ископаемых. – М.: Недра, 1982. – 669 с.
15. Яковлев Г. Ф., Зарайский Г. П., Бородаев Ю. С., Гончарова Т. Я. Взрывчатые брекчии на медноколчеданных месторождениях Блявинского рудного поля Южного Урала. // Геология рудных месторождений. – 1965. – № 6. – С. 12-21.

16. De Rao J.A., Van Staal C.R. Sulfide remobilization and sulfide breccias in the Heath Steele and Braunschweig deposits Baturst Mining Camp Nev. // *Econ. geol. Monograph: Massive sulfide deposits of the Baturst Mining Camp New Brunswick and Northern Main.* / Eds. Coodfellow W.D. VcCutcheonahd Peter J.M. – 2003. – Vol. 11. – pp. 479-496.

17. Koski R.A., Lonsdale P.F., Shanks W.C., Berndt M.E., Howe S.S. Mineralogy and geochemistry of a sediment-hosted hydrothermal sulfide deposit from the Southern Trough of Guaymas Basin, Gulf of California. // *J. Geophys. Res.* – 1985. – B90. No. 8. – pp. 6695-6707.

18. Large R.R., McPhie J., Gemmill J.B. et al. The spectrum of ore deposit types, volcanic environments, alteration halos and related exploration vectors in submarine volcanic successions some examples from Australia. // *Econ. geol.* – 2001. – Vol. 96. No. 5. – pp. 913-938.

19. Solomon M., Tornos F., Casper O.S. Es for many of the unusual features of the massive sulfide deposits of Iberian pyrite belt. // *Geology.* – 2002. – No. 1. – pp. 87-90.

20. Scott S.D. Basalt and sedimentary hosted seafloor polymetallic sulfide deposits and their ancient analogues. // *Proc. OSEANS` 83, San Francisco, 29 Aug.–1 Sept., 1983.* New York. – 1983. – Vol. 2. – pp. 818-824.

21. Zierenberg R. The formation of massive sulfide at 21°N, East Pacific Rise. // *J. Geochem. Explor.* – 1986. – Vol. 25. No. 1-2. – 250 p.

## References

1. Bogush I.A., Goncharova T. Ya. Explosive breccias of the Khudessky copper-pyrite deposit in the North Caucasus. Reports of the USSR Academy of Sciences, 1970. Vol. 191. No. 4. pp. 881-884. (In Russ.)

2. Bogush I.A., Ryabov G.V., Cherkashin V.I. Genesis and ore-bearing structures of the Chuchukur noble metals deposit of the North Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2020. Vol. 10. No. 1. pp. 81-95. (In Russ.)

3. Bortnikov N.S., Vikentiev I.V. Modern mineral formation in the oceans. Problems of ore geology, petrology, mineralogy and geochemistry. Moscow. IGEM RAN, 2004. pp. 325-355. (In Russ.)

4. *Geology of the USSR. Vol. IX. North Caucasus. Part 1. Geological description.* Moscow. Nedra, 1968. 759 p. (In Russ.)

5. Ivankin P.F. On the origin of mineralized breccias of some pyrite-type deposits in Altai and the Urals. Doklady of the USSR Academy of Sciences, 1962. Vol. 142. No. 2. pp. 422-424. (In Russ.)

6. *Pyrite deposits of the Greater Caucasus.* Moscow. Nedra, 1973. pp. 7-140. (In Russ.)

7. Maslennikov V.V. Lithogenesis and pyrite formation. Miass, Institute of Mineralogy, Ural Branch of the RAS, 2006. 384 p. (In Russ.)

8. Parada S.G., Markin M.Yu., Stolyarov V.V., Chotchaev Kh.O. Comparison of the chemical-analytical and geological Data on gold-bearing intervals of boreholes in limits of the Zygyrkol zone of Tyrnyauz ore field. *Geology of the South of Russia.* 2019. Vol. 9 (2). pp. 56-68. DOI:10.23671/VNC.2019.2.31977 (in Russ.)

9. *Ore deposits of the USSR.* Smirnov V.I. (ed.). Moscow. Nedra, 1978. 399 p. (In Russ.)

10. Ryabov G.V., Bogush I.A. Typification of pyrite deposits in the North Caucasus. *Izvestiya vuzov. North Caucasian region. Technical sciences,* 2012. No. 5. pp. 88-91. (In Russ.)

11. Skripchenko N.S. Volcanic-sedimentary ore formation (on the example of pyrite deposits of the North Caucasus). Moscow. Nedra, 1966. 292 p. (In Russ.)

12. Skripchenko N.S. Hydrothermal-sedimentary sulfide ores of basaltoid formations. Moscow. Nedra, 1972. 216 p. (In Russ.)

13. Skripchenko N.S., Tambiev A.S. Volcanics and ore content of the Devonian basalt belt of the North Caucasus. In: *Proceedings of IX Int. conf. Geology and Mineral Resources of the North Caucasus.* Essentuki, 2000. pp. 613-628. (In Russ.)

14. Smirnov V.I. *Mineral geology.* Moscow. Nedra. 4<sup>th</sup> ed. 1982. 669 p. (In Russ.)



15. Yakovlev G.F., Zarskii G.P., Borodaev Yu.S., Goncharova T.Ya. Explosive breccias at copper-pyrite deposits of the Blyavinsk ore field in the South Urals. *Geology of ore deposits*, 1965. No. 6. pp. 12-21. (In Russ.)
16. De Rao J.A., Van Staal C.R. Sulfide remobilization and sulfide breccias in the Heath Steele and Braunschweig deposits Baturst Mining Camp Nev. *Econ. geol. Monograph: Massive sulfide deposits of the Baturst Mining Camp New Brunswick and Northern Main*. Eds. Coodfello v W.D. VcCutcheonahd Peter J.M. 2003. Vol. 11. pp. 479-496.
17. Koski R.A., Lonsdale P.F., Shanks W.C., Berndt M.E., Howe S.S. Mineralogy and geochemistry of a sedimenthosted hydrothermal sulfide deposit from the Southern Trough of Guaymas Basin, Gulf of California. *J. Geophys. Res.* 1985. B90. No. 8. pp. 6695-6707.
18. Large R.R., McPhie J., Gemell J.B. et al. The spectrum of ore deposits types, volcanic environments, alteration halos and related exploration vectors in submarine volcanic successions some examples from Australia. *Econ. geol.* 2001. Vol. 96. No. 5. pp. 913-938.
19. Solomon M., Tornos F., Casper O.S. Es for many of the unusual features of the massive sulfide deposits of Iberian pyrite belt. *Geology*. 2002. No. 1. pp. 87-90.
20. Scott S.D. Basalt and sedimentary hosted seafloor polymetallic sulfide deposits and their ancient analogues. In: *Proc. OSEANS' 83, San Francisco, 29 Aug.–1 Sept., 1983*. New York. 1983. Vol. 2. pp. 818-824.
21. Zierenberg R. The formation of massive sulfide at 21° N, East Pacific Rise. *J. Geochem. Explor.* 1986. Vol. 25. No. 1-2. 250 p.

## ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 552.323.5

DOI: [10.46698/VNC.2021.42.84.002](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.42.84.002)

Оригинальная статья

# Среднеюрские вулканиты Гойтхско-Ачишхинской складчатой зоны Северо-Западного Кавказа: геохимия, геодинамическая типизация и минерагения

В. М. Газеев <sup>1,2</sup>, А. Г. Гурбанов <sup>1,2</sup>, И. А. Кондрашов <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35, e-mail: gurbanov@igem. ru;

<sup>2</sup>Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Владикавказский научный центр РАН», Россия, 362027, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркуса, 22, e-mail: gazeev@igem. ru

Статья поступила: 20.07.2021, доработана: 23.08.2021, принята к публикации: 01.09.2021

**Резюме: Актуальность работы.** В пределах южной части Скифской плиты имеются районы с ранне – среднеюрскими вулканитами и ассоциирующими с ними *Au-Ag* и полиметаллическими рудопроявлениями. Геохимическое изучение этих вулканитов необходимо для уточнения особенностей развития региона в этот временной период. **Целью исследования** является получение аналитических данных, уточнение геодинамической позиции и рудной специализации вулканитов. Объектом для исследований выбраны эффузивные и субвулканические образования Гойтхско-Ачишхинской складчатой зоны Северо-Западного Кавказа. **Методы исследования** включали: петрографическое описание пород, анализы количественными методами *XRF*, *ICP-MS*; расчеты геохимических характеристик; анализ дискриминационных диаграмм; сравнительный анализ концентраций элементов с их содержанием в эталонных породах сходного петрохимического типа из различных геодинамических обстановок. **Результаты и их обсуждение.** В результате изучения установлено, что в Гойтхско-Ачишхинской зоне распространены умеренно щелочные основные, средние и нормально щелочные кислые породы. Предполагается, что распространенные здесь умеренно титанистые, низко и умеренно магнезиальные породы основного состава являются производными предварительно эволюционировавшего высокоглиноземистого расплава, образованного при плавлении от 1 до 5% шпинелевого перидотита. Формирование очагов этих расплавов происходило в литосферной мантии на фоне процессов задугового растяжения, в тыловой части Закавказского вулканического пояса. Для вулканитов характерны повышенные концентрации *Li, Ag, Be, Bi, LILE, LREE*. Спектры *REE* основных пород, нормированные к хондриту, имеют вид наклонных линий, аналогичных профилю *E-MORB*. На мультиэлементных спектрах отмечаются отрицательные аномалии *Nb* и *Ta*. Кислые породы – это пересыщенные глиноземом образования, по концентрации *K, Rb, Ba, K/Rb, Ba/Rb* сопоставимые с гранитоидами андезитового ряда. Отмечено, что в региональном плане изученные вулканиты близки к породам Чегем-Черекского и Карачаевского вулканических районов. Установлено, что вулканиты Гойтхско-Ачишхинской зоны по геохимическим параметрам сопоставимы с породами краевых вулкано-плутонических поясов активных континентальных окраин и островных дуг. Сделано предположение о перспективности зоны развития вулканитов на обнаружение золото-серебро-полиметаллического оруденения.

**Ключевые слова:** петрография; геохимия геодинамическая типизация, минерагения.

**Благодарности:** Работа подготовлена в рамках Базовой темы Лаборатории петрографии ИГЕМ РАН «Петрология и минерагения магматизма конвергентных и внутриплитных обстановок: история формирования крупных континентальных блоков» и в рамках плана НИР КНИО ВЦ РАН при финансовой поддержке гос. темы регистрационный номер АААА-А19-119040190054-8.

**Для цитирования:** Газеев В. М., Гурбанов А. Г., Кондрашов И. А. Вулканиты Гойтхско-Ачишхинской складчатой зоны Северо-Западного Кавказа: геохимия, геодинамическая типизация и минерагения. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (3): 17 – 32. DOI: 10.46698/VNC.2021.42.84.002.

---

---

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

---

---

[DOI: 10.46698/VNC.2021.42.84.002](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.42.84.002)

Original paper

## Middle-Jurassic volcanites of the Goitkhsko-Achishkinsk folded zone of the North-Western Caucasus: geochemistry, geodynamical typification and mineraгeгy

V. M. Gazeev<sup>1, 2</sup>, A. G. Gurbanov<sup>1, 2</sup>, I. A. Kondrashov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of geology of ore deposits, petrography, mineralogy and geochemistry RAS, 35 Staromonetny Lane, Moscow 119017, Russian Federation, e-mail: gurbanov@igem. ru;

<sup>2</sup>Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 22 Markusa Str., Vladikavkaz 362027, Russian Federation, e-mail: gazeev@igem. ru

Received: 20.07.2021, revised: 23.08.2021, accepted: 01.09.2021

**Abstract. Relevance.** Within of southern part of Scythian platform there are areas with Early-Middle Jurassic volcanites and associated with it Au-Ag-polymetallic ore manifestations. Geochemical investigation of these volcanites should be adopted for refinement of peculiarities of this area development in this period of time. **The aim of the research** is to obtaine analytical data, refinement of geodynamical position and ore specialization of volcanites. Object of the research have been selected the effusive rocks and subvolcanic bodies in the Goitkhsko-Achishkinsk folded zone of North-Western Caucasus. **Methods.** Petrographical description, quantative analysis by XRF and ICP-MS methods; calculation of geochemical characteristics; analysis of discriminatory charts; comparing values of average contents of elements with their content in rocks (standards) of close petrochemical type from various geodynamic settings. **Results and its discussion.** As a result of the study, was found that in the Goitkhsko-Achishkinsk folded zone the moderately alkalinity basic, middle and normal alkalinity rocks are spread. It is supposedly, that distributed here moderately titanium, low and moderately magnesian rocks of basic composition is effected by preliminary evolving of high alumina melt which formed during 1-5% melting of spinel peridotites. Shaping focuses of these melts happened in lithospheric mantle on the background of processes of back-arc extension in the rear part of the Transcaucasian volcanic belt. The elevated concentration of Li, Ag, Be, Bi, LILE, LREE are characteristic for volcanites. Spectrums REE in basic rocks normalized to chondrite have a facies of sloping line close with E-MORB profile. On the multielement spectrums there are negative anomalies of Nb and Ta. Acid rocks – this supersaturated by alumina rocks, comparison on concentrations of K, Rb, Ba, K/Rb, Ba/Rb with granitoid of andesitic line. It was shown, that in regional plane investigated volcanites is clouse with rocks of Chegem-Cherekskogo and Karachaevskogo volcanic areas. It is established, that volcanites of the Goitkhsko-Achishkinsk folded zone according geochemical parameters are comparable with rocks of island-arc

and marginal volcano-plutonic belts of active continental margins. The supposition about considerable zone of volcanite development on detection of gold-silver-polymetallic mineralization.

**Keywords:** petrography, geochemistry, geodynamical typification, minerageny.

**Acknowledgments:** *The work was prepared in the framework of Base topic of laboratory petrography of IGEM RAS "Petrology and minerageny of magmatism of convergentic and intraplatformian situation, history of large continental blocs" and in the framework of SIW CSID VSC RAS plan with a financial support of state topics registration number AAAA-A19-119040190054-8.*

**For citation:** Gazeev V. M., Gurbanov A. G., Kondrashov I. A. Middle-Jurassic volcanites of the Goytkhsko-Achishkinsk folded zone of North-Western Caucasus: geochemistry, geodynamical typification and minerageny. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (3): 17 – 32. DOI: 10.46698/VNC.2021.42.84.002.

## Введение

**Актуальность работы.** Начиная со среднеюрского времени, южная оконечность Скифской платформы (СП) представляла собой северное плечо морского бассейна Большого Кавказа (БК) рифтогенной природы. В плинсбахе-тоаре здесь заложились грабенообразные мелководные морские бассейны и вулканические районы. Так в Дигоро-Осетинском, Чегем-Черекском и Карачаевском [Богатиков, Цветков, 1988] вулканических районах (ВР) происходили излияния лав и внедрение интрузивов. На Западном Кавказе подобные события развивались в Гойтхском ВР [Ломизе, 1969] (рис. 1). В связи с тем, что с ранне-среднеюрскими вулканоплутоническими комплексами ассоциируют полиметаллическое, золото-полиметаллическое и золото-серебряно-полиметаллическое оруденения, их комплексное изучение весьма актуально для уточнения особенностей геодинамического развития региона и его минерации. **Целью исследования** является получение аналитических данных количественными методами, геодинамическая типизация вулкаников, расшифровка петрологических процессов, оценка потенциальной рудоносности пород по геохимическим и минералогическим данным и выявление пространственных ассоциаций с ними рудных объектов. **Объектом для исследования** были среднеюрские эффузивные и субвулканические породы Гойтхско-Ачишхинской складчатой зоны (ГАСЗ) Северо-Западного Кавказа, распространенные в Псехако-Березовской (ПБЗ) и Гойтхской (ГЗ) складчатых зонах.

Вулканики ПБЗ известны в разрезах пород Гузайской, Туровой и Чаталтапинской свит. В Гузайской (синемюр-ранний плинсбах) и Туровой свитах (плинсбах-ранний тоар) это линзы туфов и туффитов среднего состава. В Чаталтапинской свите (аален) – туфы и лавы базальтового, андезитового, дацитового составов. В ГЗ вулканики присутствуют в разрезах пород макаровской свиты и свиты горы Индюк. Макаровская свита (ранний аален) содержит горизонты туфов риодацитового состава. Свита горы Индюк (поздний аален) включает мощные горизонты туфов дацитового, риодацитового составов и незначительное количество лав базальтовых порфиритов. Субинтрузивные образования ГАСЗ выделяются в качестве отдельных вулканических комплексов «Чаталтапинского» базальтового и «Гойтхского» риолитового. Первый развит в пределах ПБЗ и представлен небольшими силлами, дайками габброидов, долеритов, диабазов и плагиогранитов. Второй развит в пределах ГЗ и представлен субсогласными телами дацитов, риодацитов и редкими дайками щелочных габброидов (тешенитов), прорывающих породы свиты горы Индюк [Корсаков и др., 2002]. В процентном отношении количество базальтоидов достигает 35%, дацитов и риолитов – 64%, трахиандезитов и трахитов 1% [Большой Кавказ...., 2007].

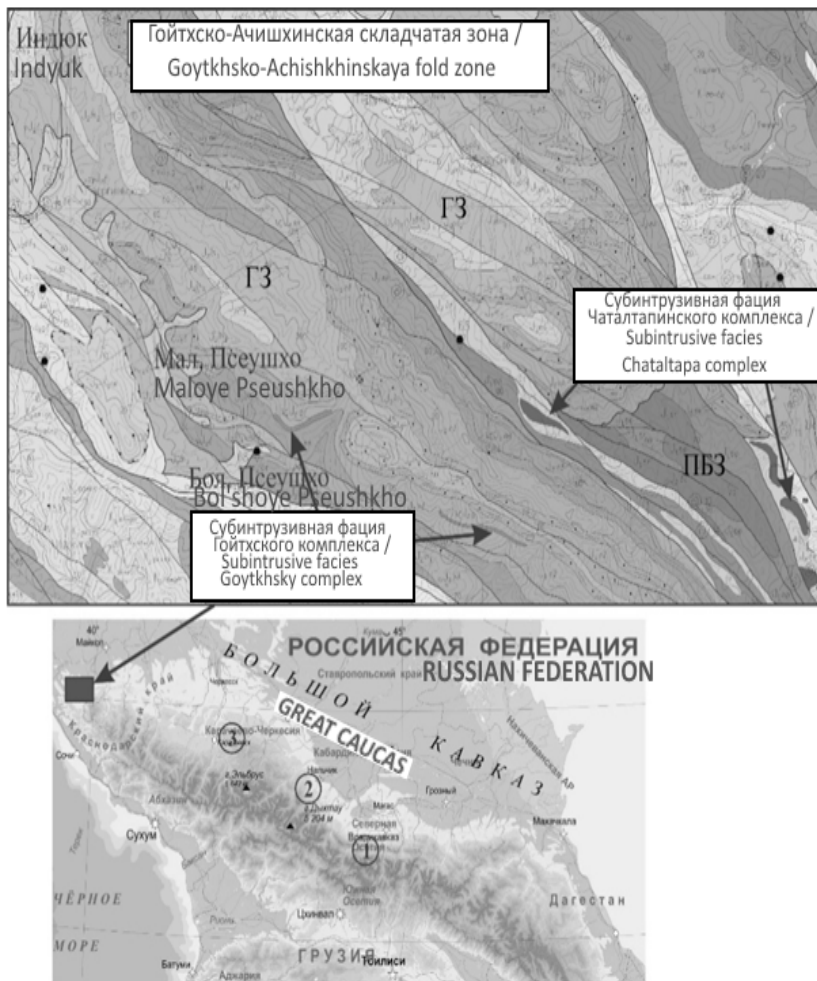


Рис. 1. Геологическая карта Гойтхско-Ачишхинской складчатой зоны (по данным ФГУГП «Кавказгеолсъемка», лист L-37-XXXIV, 2002 г.). Условные обозначения: ПБЗ – Псехако-Березовская зона; ГЗ – Гойтхская зона. Вулканические районы; 1 – Дигоро-Осетинский; 2 – Чегем-Черекский; 3 – Карачаевский /

Fig. 1. Geological map of Goitkhsko-Achishkhinsk folded zone (according materials of FGUGP «Kavkazgeols'emka», sheet L-37-XXXIV, 2002y.). Legend: ПБЗ – Psekhako-Berezovskaya zone; ГЗ – Goitkhskaya zone. Volcanic areas: 1 – Digoro-Osetian; 2 – Chegem-Chereksky; 3 – Karachaevsky /

Нами приводятся результаты геохимического изучения распространенных в ГАСЗ вулканических пород, их геодинамической типизации, геохимических особенностей и минерагенической специализации.

### Фактический материал и методы исследований

В качестве исходного фактического материала использована коллекция вулканитов Гойтхско-Ачишхинской складчатой зоны, собранная в 1988-1991 и 2010 гг. Лабораторные исследования выполнены в ЦКП «ИГЕМ-Аналитика». Определения концентраций микроэлементов и содержаний петрогенных оксидов (27 проб) получены на спектрометре «Респект-100» (XRF – рентгено-флюоресцентный анализ). Редкие, редкоземельные и рудные элементы определены с использованием спектроскопического метода индукционно-связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием (ICP-MS, масс-спектрометр X-SeriesII). Применение данной методики принято в ЦКП «ИГЕМ-Аналитика». Точность измерений контролировалась рос-

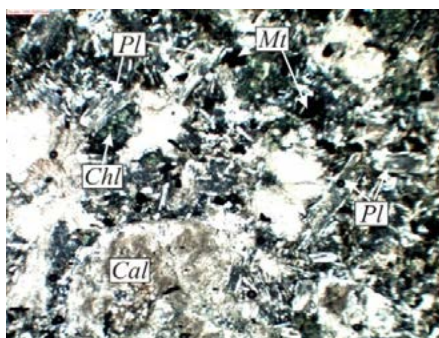


Рис. 2-1. Измененный базальтовый порфирит. (Д-2,9) /  
Fig. 2-1. Modified basaltic porphyrite (D-2.9)



Рис. 2-2. Диабазовый порфирит. Структура порфировая. Основная масса – микродиабазовая (Д-2,9) /  
Fig. 2-2. Diabase-porphyrity. Texture porphyritic, basic mass is microdiabasic (D-2.9)

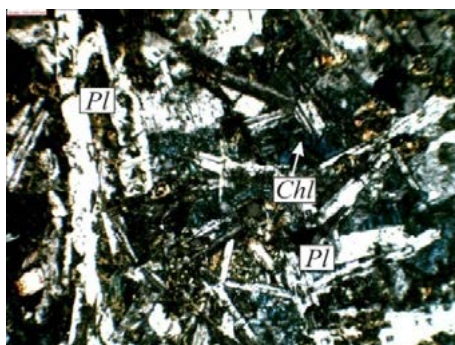


Рис. 2-3. Диабаз. Структура диабазовая. (Д-1,5) /  
Fig. 2-3. Diabase. Texture diabasic (D-1.5)

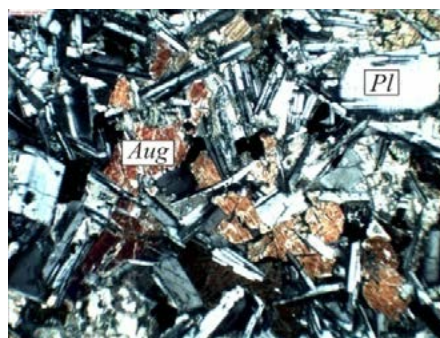


Рис. 2-4. Тешенит. Структура долеритовая (Д-2,9) /  
Fig. 2-4. Teshenite. Texture doleritic (D-2.9)

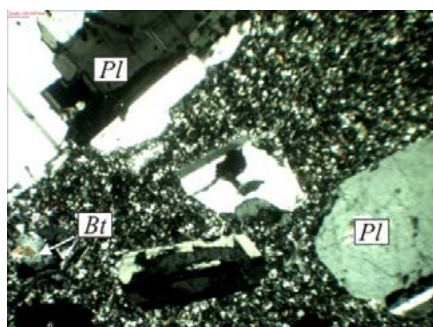


Рис. 2-5. Дацитовый порфир. Структура порфировая, основная масса аллотриоморфная (Д-2,9) /  
Fig. 2-5. Dacitic porphyry. Texture porphyritic, basic mass is allotriomorphic (D-2.9)

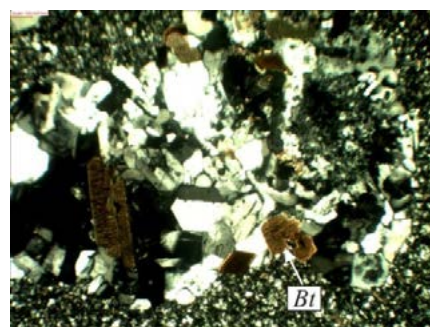


Рис. 2-6. Гомеогенные включения в дацитовых порфирах (Д-2,9) /  
Fig. 2-6. Homeogenic inclusions in dacitic porphyry (D-2.9)

Рис. 2. Микрофотографии пород. Условные обозначения. Pl – плагиоклаз, Bt – биотит, Chl – хлорит, Cal – кальцит, Aug – авгит, Mt – магнетит. Д – диагональ снимка в мм /

Fig. 2. Microphoto rocks. Legend: PL – plagioclase; Bt – biotite; Chl – chlorite; Cal – calcite; Aug – augite; Mt – magnetite; D – diagonal of photo in mm

сийскими и международными стандартами. При рассмотрении петрохимических характеристик дополнительно использованы опубликованные анализы [Ломизе, 1969; McCann et al., 2010].

Среди вулканических пород ГАСЗ встречаются субвулканические, эффузивные и эксплозивные разновидности. Они представлены долеритами, диабазами, базальтовыми порфиритами, тешенитами, дацитами, риодацитами, и туфами средне-кислого и основного составов (рис. 2).

**Базальтовые порфириты** образуют лавовые потоки. Структура пород сериально-порфировая и гломеропорфировая. Вкрапленники представлены кристаллами реликтового лабрадора размером до  $1 \times 2,5$  мм, замещенного альбитом и карбонатом, и более мелкими (до  $0,2 \times 0,5$  мм) лейстами андезина; в интерстициях хлорит, карбонат, рудный минерал; местами присутствуют зерна-реликты пироксена. **Долеритами и диабазами** сложены дайки и силлы. Структура пород диабазо-офитовая, долеритовая, афировая и порфировая. Породы состоят из удлиненно-таблитчатых и, редко, ситовидных кристаллов плагиоклаза (андезина – лабрадора), которые замещаются альбитом и карбонатом. В интерстициях карбонат, хлорит, сфен, рудный минерал, авгит и иддингсит. **Дациты и риодациты** слагают субвулканические тела мощностью до 100-140 м и дайки. Структура порфировая и гломеропорфировая. Вкрапленники размером до 2-3 мм представлены пелитизированными кристаллами плагиоклаза (олигоклаз, олигоклаз-андезин), кварца, биотита и иногда розового граната (альмандин). Основная масса аллотриоморфная и фельзитовая, состоит из плагиоклаза, калиевого полевого шпата, биотита, магнетита. Отмечаются микрополости с карбонатом и хлоритом. **Тешениты** встречаются в виде даек и штокообразных тел. Они представлены полнокристаллической породой с порфировидной и гранулоофитовой структурой и сложены кристаллами лабрадора (№ 60-70, вплоть до битовнита в центре кристаллов), титан-авгита (15-20%) и рудным минералом. Вторичные минералы – карбонат, хлорит и редко цеолиты.

Фигуративные точки (ФТ) средних и основных пород на классификационной диаграмме  $(Na_2O + K_2O) - SiO_2$  (рис. 3-1) преимущественно приурочены к полю составов умеренно – щелочных пород, а кислых пород – к полю составов нормально-щелочных и низко-щелочных пород. Преобладают базальты, андезибазальты, дациты, реже встречаются андезиты и риолиты. Для изученных пород преимущественно основного состава характерны большие потери при прокаливании (ППП), часто достигающие 9-14%. На диаграмме  $Zr/TiO_2 * 0,0001 - Nb/Y$  (рис. 3-2) критерием щелочности является  $Nb/Y$ ; ФТ здесь сгруппированы в поле субщелочных базальтов, андезитов, андезибазальтов и риодацитов. На диаграмме  $AFM$  (рис. 3-3) ФТ образуют непрерывный ряд в поле известково-щелочных пород и вдоль линии их раздела с породами толеитовой серии. На диаграммах  $SiO_2$  – петрогенные элементы отмечена отрицательная корреляция  $TiO_2, Fe_2O_3, MgO, CaO$  с содержанием  $SiO_2$  (рис. 4). Отчетливо выраженные тренды позволяют предполагать, что формирование петрохимической совокупности от базальтов до андезибазальтов и андезитов произошло в результате кристаллизационного фракционирования исходной магмы. Содержания  $K_2O, Na_2O$  (табл. 1, 2) варьируют в широких пределах, без видимых закономерностей. Породы основного состава представлены умеренно-титанистыми, а также низко- и умеренно-магнезиальными ( $Mg\# = 0,38-0,63$ ), умеренно- и высоко-глиноземистыми ( $Al^I = 0,85-1,8$ ) разностями, с колебаниями величин  $Na_2O/K_2O$  в пределах 2,8-25.

Кислые разновидности – это пересыщенные глиноземом ( $Al_2O_3 > CaO + K_2O + Na_2O$ ) породы с  $Al^I = 1,2-1,9$ ;  $Mg\# = 0,11-0,45$ ;  $Na_2O/K_2O = 0,85-3,5$ . На дискриминационных диаграммах (ДД) вулканыты ГАСЗ диагностируются неоднозначно: на диаграмме  $MgO - FeO_t - Al_2O_3$  [Pearce et al., 1977] (рис. 5-1) – это базальты, характерные для активных континентальных окраин и для вулканических дуг; на ДД

Табл. 1 / Table 1

Результаты RFA вулканитов ГАСЗ (оксиды в масс. %; элементы в г / г) /  
Results RFA of volcanites GACS (oxides in wt. %, elements – in ppm)

№ обр. / Sample number	403	406-1	43/90	17/90	30/90	33/90	29/91	67/91	38/90	153	154-6
SiO2	65,52	40,72	42,62	46,16	43,26	45,53	45,50	46,14	74,77	66,84	68,50
TiO2	0,53	0,72	1,65	1,59	0,70	1,13	1,70	1,69	0,17	0,59	0,68
Al2O3	14,12	13,77	15,61	19,13	15,89	16,89	17,97	17,82	13,94	14,02	14,14
Fe2O3	3,49	8,91	9,18	8,42	9,78	12,91	9,56	9,28	1,78	5,55	4,52
MnO	0,07	0,39	0,510	0,15	0,31	0,36	0,20	0,16	0,22	0,06	0,13
MgO	1,07	6,71	2,33	6,30	8,73	4,92	7,37	7,34	0,11	1,93	1,96
CaO	2,76	11,52	13,14	10,94	8,16	4,81	9,54	10,08	0,10	0,43	1,69
Na2O	4,74	2,67	3,25	2,93	2,71	3,08	2,79	2,69	7,47	3,12	3,22
K2O	3,83	0,19	1,10	0,66	0,28	0,40	0,76	0,79	0,10	4,03	2,24
P2O5	0,09	0,07	0,34	0,30	0,07	0,32	0,37	0,37	0,01	0,13	0,09
ппп	3,18	14,12	9,47	3,30	9,98	9,47	4,04	3,49	1,28	2,88	2,53
Сумма / Sum	99,4	99,79	99,2	99,88	99,87	99,82	99,8	99,85	99,95	99,58	99,7
Cr	38	339	39	161	386	60	146	171	14	58	58
V	68	165	222	148	173	245	152	146	8	87	95
Co	11	29	29	34	48	29	36	45	12	6	6
Ni	19	301	35	74	419	35	99	120	9	14	9
Cu	10	19	56	77	131	121	75	72	16	14	10
Zn	31	48	73	74	68	132	60	64	31	43	24
Pb	15	10	<10	-	-	-	-	-	-	29	17
Rb	103	10	18	13	13	19	14	14	10	133	63
Sr	124	244	389	393	237	167	364	349	29	155	141
Ba	549	128	221	99	220	202	121	111	125	1167	611
Nb	9	3	19	16	6	9	14	16	8	15	11
Zr	189	48	172	156	57	136	156	162	85	184	205
Y	35	20	31	33	20	42	34	32	14	31	34

Примечание: 153 и 154 – вулканиты района горы «Два брата». 38/90 – р. Куша. Суббота. 17/90 – р. Куша. 30/90 – М. Псеушхо. 33/90 – р. Кокай. 43/90 – г. Семашко. 29/91, 67/91 – р. Кушинко. 403 – Гойтхский комплекс. 406-1 – Чагалапнская свита. / Comments: 153, 154 – volcanites from area mountain "Two brothers"; 38/90 – creek "Saturday"; 17/90 – river Kusha; 30/90 – М. Pseushkho; 33/90 – river Kokaj; 43/90 – mountain Semashkho; 29/91, 67/91 – river Kushinko; 403 – Goitkhsky complex; 406-1 – Chatalapinskaya suite.



Табл. 2 / Table 2

**Результаты ISP-MS анализа вулканитов ГАСЗ /  
Results of ICP-MS analysis of volcanites GACS (elements in ppm)**

Элементы (в г/т) / Elements (in g/t)	Номера проб / Sample numbers										
	406-1	406	17/90	18/90	30/90	33/90	43/90	29/91	67/91	38/90	403
Li	80	92	60,47	41,49	77,34	88,71	23,55	65,94	65,93	14,42	26
Be	0,50	0,46	1,00	2,18	0,39	1,54	1,48	0,86	1,04	0,28	1,9
Sc	24	27	25,6	21,2	27,1	20,0	15,0	26,9	23,7	2,6	11
Ti	3884	4178	8823	9306	3420	6157	8754	9844	9378	800	2804
V	150	152	166	174	152	255	178	178	165	5	55
Cr	250	362	151	144	303	52	41	144	158	3	32
Mn	2905	6258	994	2148	2141	2599	3648	1470	1173	1568	518
Co	36	41	31	31	38	32	28	33	38	9	7,4
Ni	234	221	54	48	264	27	26	68	87	9	32
Cu	6,4	95	57,3	57,0	86,3	84,1	47,0	53,7	54,0	16,7	<ПО
Zn	63	56	71,7	57,0	58,8	104,5	55,8	76,7	79,8	24,2	36
Ga	16	14	17,2	20,84	16,2	24,3	20,61	17,2	16,3	11,64	31
Rb	4,2	1,8	5,2	8,3	5,1	14,2	13,6	6,3	6,9	1,2	94
Sr	253	228	372,4	406,4	216,4	130,2	342,6	363,8	340,4	24,5	107
Y	13	15	20,6	22,2	12,3	26,8	20,5	21,7	20,0	8,6	29
Zr	41	44	127,2	124,7	41,3	111,9	179,7	135,9	144,4	76,4	57
Nb	1,1	1,4	10,6	12,2	1,4	6,0	24,5	12,3	13,3	1,3	7,2
Mo	<ПО	<ПО	0,74	0,56	<ПО	<ПО	0,54	0,64	0,56	0,77	<ПО
Ag	0,18	0,19	–	0,30	–	0,27	0,41	–	–	–	0,21
Cd	0,16	0,14	0,19	0,19	0,08	0,23	0,26	0,23	0,18	0,08	0,18
Cs	0,52	0,35	0,32	0,28	0,44	0,29	<ПО	0,26	0,30	0,05	2,5
Ba	147	119	95	191	184	178	199	100	89	98	521
La	4,0	5,1	10,56	11,56	3,84	18,96	16,10	11,59	11,90	7,19	20
Ce	10	13	25,00	26,93	9,56	40,24	37,75	27,44	28,30	17,88	44
Pr	1,4	1,8	3,39	3,51	1,40	4,92	4,04	3,75	3,74	2,15	5,5
Nd	6,4	7,9	15,09	15,31	6,67	19,79	15,89	16,80	16,46	8,71	21
Sm	2,0	2,5	3,68	4,10	1,79	4,94	3,97	4,07	3,80	1,65	5,0
Eu	0,76	0,85	1,41	1,40	0,74	1,42	1,20	1,54	1,42	0,42	0,90
Gd	2,1	2,8	4,26	3,92	2,19	4,64	3,46	4,64	4,43	1,68	4,9
Tb	0,39	0,46	0,68	0,72	0,37	0,81	0,67	0,73	0,69	0,25	0,84
Dy	2,5	3,0	4,22	4,41	2,43	4,79	4,24	4,47	4,14	1,51	5,4
Ho	0,56	0,63	0,84	0,90	0,50	1,01	0,85	0,89	0,83	0,31	1,1
Er	1,6	1,9	2,37	2,58	1,50	2,92	2,39	2,53	2,34	0,93	3,3
Tm	0,25	0,28	0,32	0,36	0,21	0,44	0,35	0,33	0,31	0,13	0,50
Yb	1,4	1,7	2,06	2,22	1,42	2,81	2,18	2,16	2,04	0,89	3,1
Lu	0,22	0,25	0,30	0,33	0,21	0,43	0,33	0,32	0,30	0,14	0,43
Hf	1,2	1,3	2,69	2,70	1,20	3,07	4,03	2,91	3,06	1,98	2,0
Ta	0,10	0,13	0,67	0,73	0,11	0,31	1,54	0,77	0,83	0,11	0,65
W	0,58	0,36	0,08	3,04	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	0,12	2,1
Pb	4,1	3,3	1,09	3,03	1,56	13,14	3,72	1,66	1,21	3,11	14
Bi	0,011	0,014	<ПО	<ПО	<ПО	0,06	<ПО	<ПО	<ПО	0,04	0,25
Th	0,93	1,2	0,80	0,97	0,64	4,73	2,61	0,82	0,89	1,37	11
U	0,22	0,28	0,27	0,85	0,10	1,68	1,00	0,28	0,34	0,33	3,2

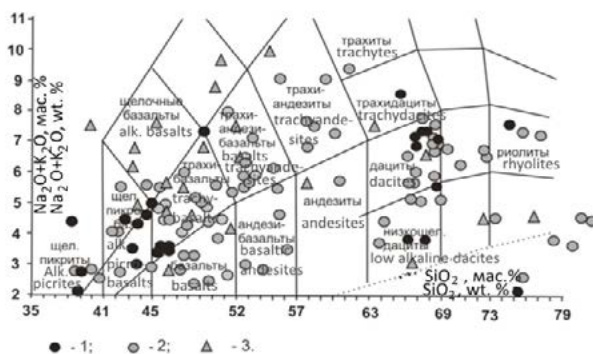


Рис. 3-1.  $Na_2O+K_2O - SiO_2$  /  
Fig. 3-1.  $Na_2O+K_2O - SiO_2$

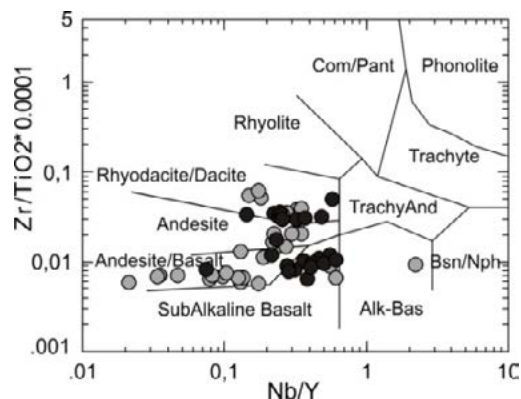


Рис. 3-2.  $Zr/TiO_2*0,0001-Nb/Y$  /  
Fig. 3-2.  $Zr/TiO_2*0,0001-Nb/Y$

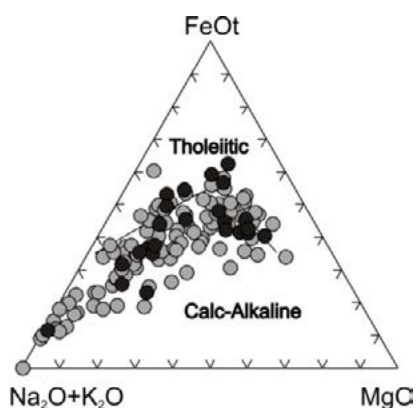


Рис. 3-3.  $(Na_2O+K_2O) - FeOt-MgO$  /  
Fig. 3-3.  $(Na_2O+K_2O) - FeOt-MgO$

Рис. 3. Составы пород, представленные на классификационных диаграммах. Условные обозначения: 1 – XRF выполнен в ЦКП «ИГЕМ – Аналитика»; 2 – силикатные анализы и XRF по [Ломизе, 1969; McCann et al., 2010]; 3 – Обломки вулканитов из туфогенных конгломератов [Ломизе, 1969] /

Fig. 3. Compositions rocks on classificational diagram. Legend: 1 – XRF was done in CCU “IGEM-Analytics”; 2 – silicate analysis and XRF according [Lomize, 1969; McCann et al., 2010]; 3 – debris of volcanites from tufogene conglomerate [Lomize, 1969]

$P_2O_5 - Zr$ , с линией раздела полей щелочных базальтов и толеитов [Floyd, Winchester, 1975] (рис. 5-2), ФТ группируются в поле толеитов; на ДД  $Zr/Y - Zr$  [Pearce, Norry, 1979] (рис. 5-3) – в поле внутриплитных базальтов; на ДД  $Zr/4 - Nb*2 - Y$  [Meschede, 1986] (рис. 5-4) в полях внутриплитных толеитов и базальтов океанических дуг; на ДД, где проведено разграничение мантийных источников  $Nb/Y - Zr/Y$  [Condie, 2005] (рис. 5-5), ФТ группируются вдоль линии  $\Delta Nb$  – от РМ к EN и в области распространения пород активных континентальных окраин и островных дуг, образованных без участия плюмовых источников; на ДД  $Sm/Yb - La/Sm$  [Школьник и др., 2009] (рис. 5-6) ФТ «маркируют» тренд плавления шпинелевых перидотитов. Степень плавления составляет 1-5%.  $Ni/Co$  отношение 1,0-10,3 ( $\Sigma/n$  4,0) сопоставимо с  $Ni/Co$  мантийных выплавов (2,5-5,0).  $U/Th$  отношение (0,2-0,9) < 1. На ДД  $Rb - (Y+Nb)$  [Pearce et al., 1984] (рис. 5-7) ФТ дацитов и риодацитов находятся в поле (VAG) – гранитоидов вулканических дуг.

Спектры REE пород основного состава (рис. 6), нормированных к хондриту [San, McDonough, 1989], представлены наклонными линиями, расположенными над и под линией E-MORB:  $Gd^{II}/Yb^{II} = 1,3-1,8$ ,  $La^{II}/Sm^{II} = 1,3-2,6$ . Отношение  $La^{II}/Yb^{II}$ , как показатель степени фракционирования REE, находится в пределах от 1,2 до 10,3.  $\Sigma REE = 33-108$  г/т. Концентрации несовместимых элементов (рис. 6) в ОП, нормированные к N – MORB [San, McDonough, 1989], формируют две группы спектров в которых отмечается обогащение пород LREE и LILE. Для нижней группы, в сравнении с E – MORB, заметны положительные аномалии Sr, Ba и отрицательные аномалии Ta, Nb, Hf, Zr и Ti. Во второй группе положительные аномалии Ba, K, Sr, P. Да-

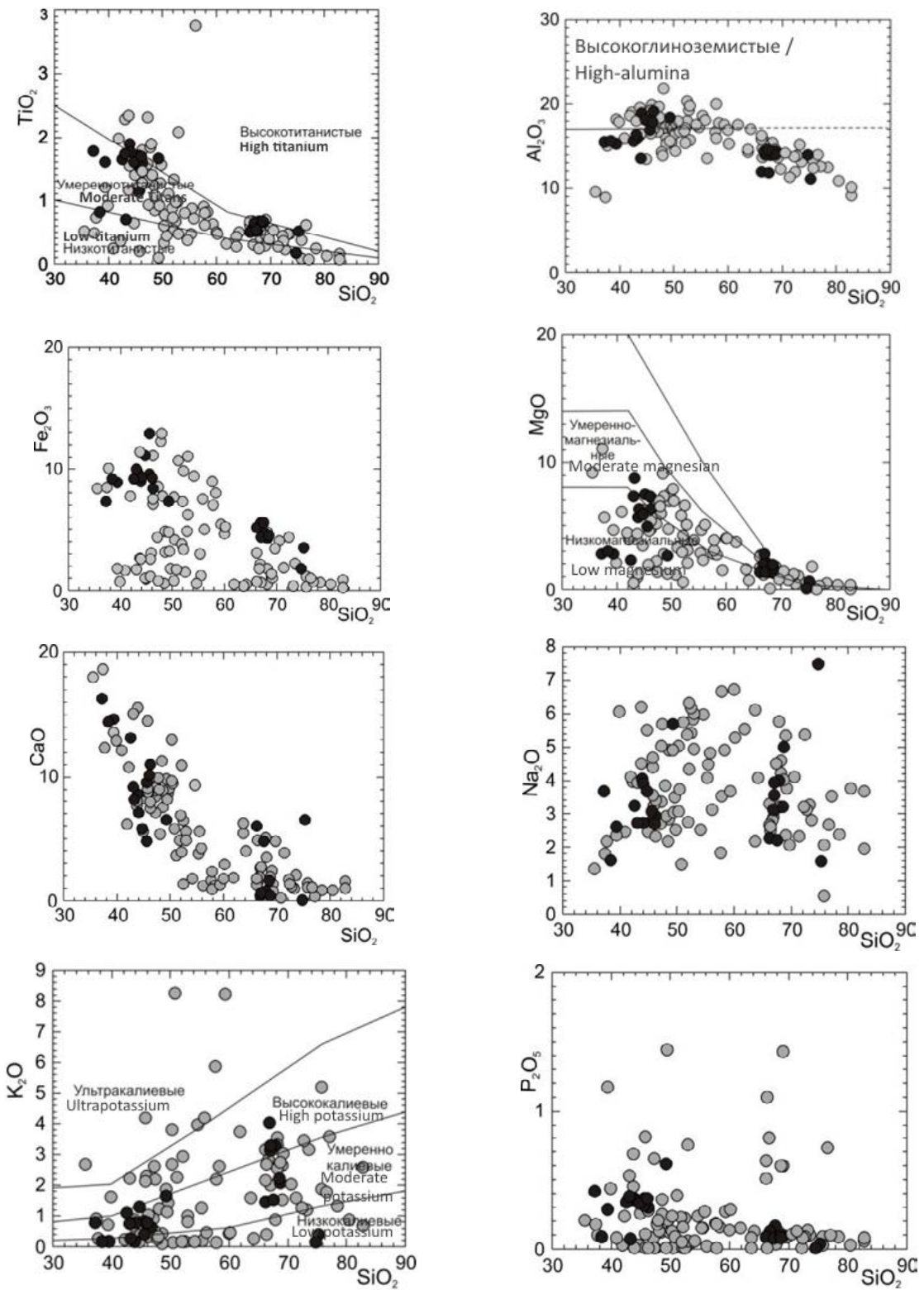


Рис. 4. Концентрации петрогенных оксидов (в масс. %). Усл. обозначения приведены на рисунке 3 /  
 Fig. 4. Diagrams concentration of petrogenic oxides (in wt. %). Legend on Fig. 3

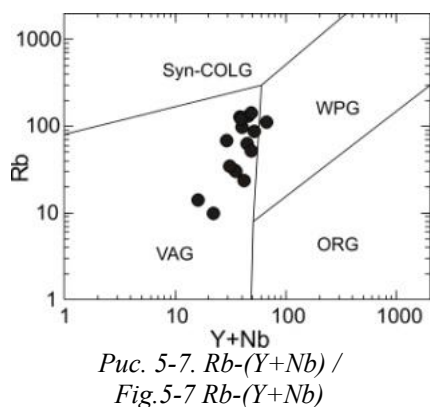
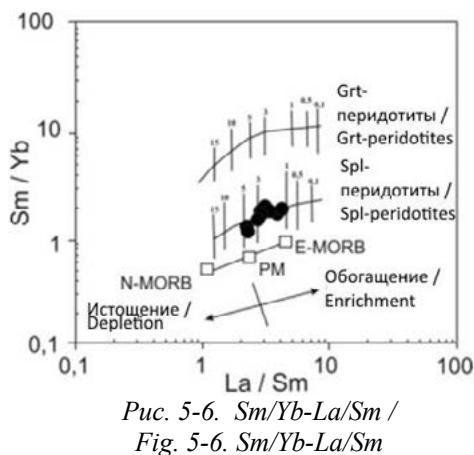
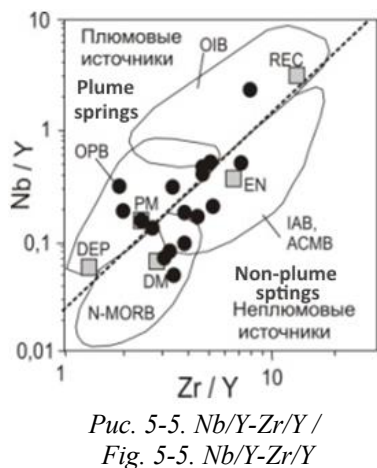
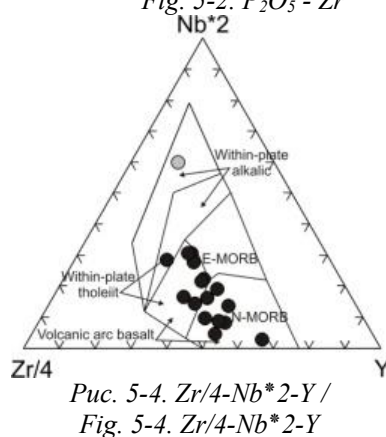
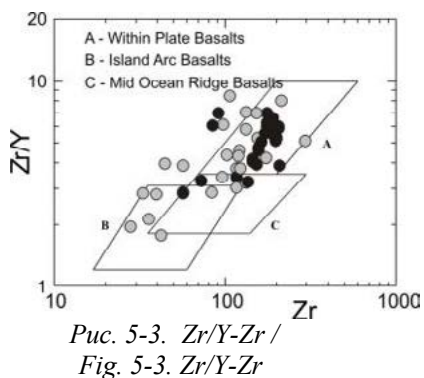
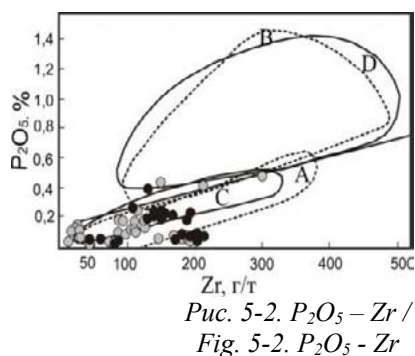
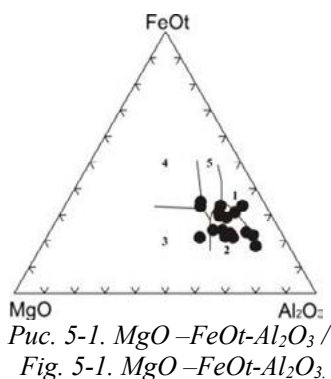


Рис. 5. Петрогенетические диаграммы составов пород /  
Fig. 5. Petrogenetic diagrams of rock compositions

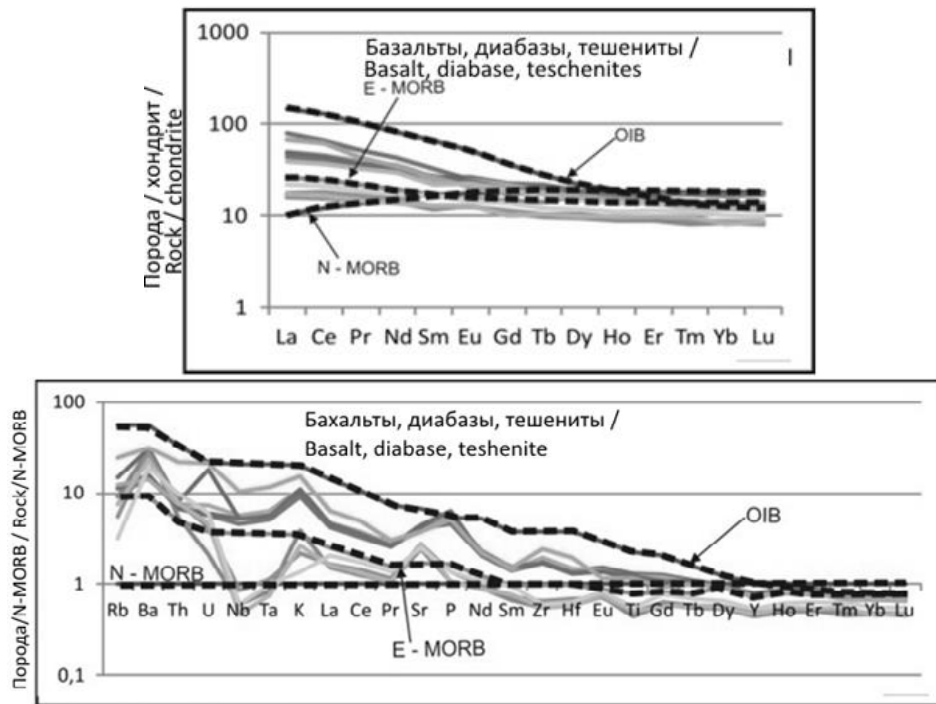


Рис. 6. Спайдер-диаграммы составов пород.

Примечание: Концентрации несовместимых элементов нормированы к N-MORB; концентрации REE нормированы к хондриту, по [San, McDonough, 1989] /

Fig. 6. Spider-diagrams of rock compositions

Comments: Concentration of incompatible elements are normalized to N-MORB; concentration of REE are normalized to chondrite according [San, McDonough, 1989]

циты и риодациты имеют схожий профиль REE с небольшим европиевым минимумом:  $La^u/Yb^u = 5,2-5,6$ ,  $La^u/Sm^u = 2,6-40,5$ ,  $Gd^u/Yb^u = 1,3-2,1$ . Дефицит европия  $Eu/Eu^*$  ( $Eu^* = (Sm_n + Gd_n)/2$ ) составляет от 0,51 до 0,76.  $\Sigma REE_{44} = 116$  г/т. В основных, по составу, вулканитах ГАСЗ отмечены вариации величин изотопных отношений:  $^{87}Sr/^{86}Sr$  составляет 0,704598-0,705857;  $^{143}Nd/^{144}Nd = 0,512591-0,513021$  [McCann et al., 2010], которые идентичны андезитам и андезибазальтам Карачаевского ВР –  $^{87}Sr/^{86}Sr = 0,7045-0,7059$ ;  $^{143}Nd/^{144}Nd = 0,51248-0,51252$ .

Для установления геохимической специализации изученных пород составлены ранжированные ряды кларков концентрации ( $K_k > 1,1$ ): базальтовые порфириды –  $Bi_{6,0} Li_{3,7} Be_{2,8} Ag_{2,6} Mn_{1,9} U_{1,5} Nb_{1,4} Th_{1,2} Co_{1,2} Cd_{1,2} Hf_{1,1} Ni_{1,1} (Ba_{0,6} Pb_{0,9} Zn_{0,8})$ ; долериты и диабазы –  $Li_{3,6} Be_{2,4} Ag_{2,6} Mn_{1,8} Ni_{1,7} Nb_{1,1} Co_{1,1} (Ba_{0,5} Pb_{0,3} Zn_{0,8})$ ; тешениты –  $Li_{3,2} Be_{2,6} Nb_{1,9} Co_{1,2} Ni_{1,1} (Ba_{0,3} Zn_{0,9})$ ; дациты –  $Bi_{6,8} U_{6,5} W_{4,5} Ag_{4,0} Ti_{2,8} Cr_{2,5} Mn_{1,9} Sc_{1,6} Co_{1,3} Ni_{1,2} (Ba_{1,2} Pb_{0,5} Zn_{0,6})$ . При сравнении полученных нами данных с результатами имеющихся исследований по близким петро-геохимическим типам в различных геодинамических обстановках [Гусев и др., 1999] установлено следующее. Изученные петрографические и петрохимические типы сопоставимы с породами островных дуг и краевых вулcano-плутонических поясов, приуроченных к активным континентальным окраинам, с характерной для них «литофильной» и «халькофильной» геохимической специализацией.

## Результаты работы

В ааленское и байосское время вдоль южной периферии рифтогенного трога БК формировался среднеюрский Закавказский вулканический пояс. На границе с оке-

аном Нео-Тетис этот вулканический пояс маркировал юрскую окраину континента. На южной окраине СП и севернее рифтогенного трога БК, с позднесинемюрского времени накапливались континентальные и мелководные морские отложения. В зоне задугового растяжения образовались спилит-диабазовые дайковые пояса, прослеживающиеся более чем на 700 км [Никишин и др., 2005; Ломизе, Суханов 2006]. К северу от структуры растяжения возникли и локально развивались рассредоточенные в пространстве ВР, активность в которых проявилась в синемюре и раннем плинсбахе и, после небольшого затишья, продолжилась в позднем плинсбахе-раннем тоаре; в ааленское время она проявилась незначительно. Существуют представления, что в геодинамическом отношении эти ВР являются островодужными объектами, расположенными в тыловой части палеоостровной дуги Северного Кавказа мезозойского возраста [Богатиков, Цветков, 1988], либо объектами Северокавказской трансформной континентальной окраины нижне-среднеюрского возраста [Гусев, 1990]. По другим данным, все проявления вулканизма на БК в ранней юре и аалене связаны с процессом заложения и развития его рифтогенного бассейна [Большой Кавказ, 2007].

Вулканисты, распространенные в ГАСЗ, представлены долеритами, базальтовыми порфиридами, диабазами, тешенитами, дацитами. Породы основного состава (ОС) характеризуются умеренными содержаниями  $TiO_2$  (0,7-1,9%) (рис. 4), умеренными и высокими содержаниями  $Al_2O_3$  (1,3-19,1%). Из  $Sm/Yb-La/Sm$  диаграммы [Школьник и др., 2009] (рис. 5-6) следует, что исходный расплав образовался при плавлении шпинелевых перидотитов. Степень плавления протолита от 1 до 5%. Умеренная магнезиальность ( $Mg^{\#}=0,38-0,63$ ) может указывать на то, что изученные породы – производные уже эволюционировавшего расплава. На дискриминационных диаграммах они диагностируются как базальты активных континентальных окраин и вулканических дуг, образовавшиеся без участия плюмовых источников, как и внутриплитные базальты. Известно, что для известково-щелочных и толеитовых базальтов активных континентальных окраин и островных дуг характерны значительный диапазон  $SiO_2$  (от 45 до 53%), повышенные значения  $Al_2O_3$  (от 16 до 20%) и низкие – для  $TiO_2$  ( $\leq 1\%$ ). Повышенное же значение  $TiO_2$  (2–2,5%) характерно для базальтов зон задугового растяжения [Туркина, 2014]. Так как в основных породах (ОП) установлено повышенное содержание  $TiO_2$ , то логично предположить, что на формирование расплавов оказывали влияние эффекты (фазы) задугового растяжения. Низкие концентрации в ОП ГАСЗ  $Nb$ ,  $Ce$ ,  $Th$ ,  $Hf$ ,  $Zr$  не позволяют считать их образованиями континентальных рифтов или ВПП тыловых рифтов зон активных континентальных окраин. Сравнение пород Чегем-Черекского и Карачаевского ВР [Газеев и др., 2019] с их аналогами из ГАСЗ по их положению на дискриминационных, спайдер- и мультиэлементных диаграммах, изотопии  $^{87}Sr/^{86}Sr$ ,  $^{143}Nd/^{144}Nd$  указывает на идентичность их источников. На основании близости геохимических параметров кислых и ОПГАСЗ предполагается, что они образовались в результате взаимодействия базальтового расплава с породами континентальной коры СП. По содержаниям  $K = 1,81\%$ ,  $Rb = 75$  г/т,  $Ba = 458$  г/т, а также отношениям  $K/Rb=241$  и  $Ba/Rb=6,1$ , они близки к гранитоидам андезитового (известково-щелочного) ряда ( $K=2,0\%$ ;  $Rb=100$  г/т;  $Ba=650$  г/т;  $K/Rb=200$ ;  $Ba/Rb=6,6$ ), с которыми обычно ассоциирует  $Au - W$ ,  $Au - Ag$ ,  $Cu - Mo$  оруденение.

С субинтрузивными образованиями Чаталтапинского комплекса пространственно ассоциируют проявления кварц-диксит-киноварной формации, жилы и зоны дробления с полиметаллическим оруденением. Известны находки обломков медно-колчеданных руд. С породами Гойтхского комплекса ассоциируют шлиховые потоки сфалерита и киновари [Корсаков и др., 2002]. В шлиховых пробах, отобранных в полосе развития субвулканической фации Гойтхского комплекса при минералогических исследованиях в легкой фракции выявлено тонкодисперсное

проволочковидное золото размерностью менее 1 мм по длинной оси (устное сообщение С.Г. Корсакова). По аналогии с Чегем-Черекским ВР, к которому приурочено Радужное месторождение и мелкие рудопроявления полиметаллов, *Au* и *Ag*, и Карачаевским ВР, где известно золото-серебро-полиметаллическое Ковалевское рудопроявление, а также обнаружение золото-серебряных месторождений в зрелых островных дугах и в ВПП активных континентальных окраин [Ширай и др., 1999], можно полагать, что в пределах ГАСЗ возможно обнаружение подобных объектов, в том числе черносланцевого золото-серебро-полиметаллического и золото-платиноидного с полиметаллами типов оруденения [Гурбанов и др., 2021]. Наиболее перспективными на проведение поисковых работ на эти типы оруденения являются отмечаемые здесь флюидно-эксплозивные брекчии [Борсук, 1963], зоны вторичных изменений вулканитов и вмещающих их углеродистых флишоидных (черносланцевых) толщ.

### Выводы

В Гойтхско-Ачишхинской складчатой зоне изучены петрохимические и геохимические особенности среднеюрских эффузивных и субвулканических пород (от основного до кислого составов). Для них характерны повышенные содержания *Ag*, *Bi*, *Li*, *Be*, *LILE* и *LREE*. Предполагается, что породы основного состава ГАСЗ являются продуктами предварительно эволюционировавшего высокоглиноземистого расплава, который образовался при 1-5% плавлении шпинелевого перидотита. Формирование очагов этих расплавов происходило в литосферной мантии на фоне процессов задугового растяжения в тыловой части Закавказского вулканического пояса. Кислые породы ГАСЗ – это высокоглиноземистые образования, сформировавшиеся в результате взаимодействия базальтового расплава с породами коры СП. По содержанию *K*, *Rb*, *Ba* и величинам отношений *K/Rb*, *Ba/Rb* они сопоставимы с гранитоидами андезитового (известково-щелочного) ряда. Анализ дискриминационных диаграмм и геохимической специализации основных и кислых пород ГАСЗ показывает, что они близки к породам островных дуг и краевых вулкано-плутонических поясов зон активных континентальных окраин. Сравнение петрохимии, геохимии и изотопии  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  пород Чегем-Черекской, Карачаевской ВО и ГАСЗ указывает на идентичность их мантийных источников. В связи с развитием в Чегем-Черекском и Карачаевском ВР золото-серебро-полиметаллического оруденения, типичного для развитых островодужных систем и краевых вулкано-плутонических поясов зон активных континентальных окраин, сделано предположение о перспективности ГАСЗ на данный тип оруденения.

### Литература

1. Богатиков О. А., Цветков А. А. Магматическая эволюция островных дуг. – М.: Изд. «Наука», 1988. – 241 с.
2. Большой Кавказ в альпийскую эпоху. / Гл. ред. акад. Ю. Г. Леонов. – М.: ГЕОС, 2007. – 368 с.
3. Борсук А. М. Петрология мезозойских магматических комплексов западного окончания Главного Кавказского хребта. – М.: Наука, 1963. – 160 с.
4. Газеев В. М., Гурбанов А. Г., Кондрашов И. А. Мезозойские субщелочные породы Центральной части Северного Кавказа: геодинамическая типизация, геохимия и минералогия. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. №3. – С. 47-62. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36479.
5. Гурбанов А. Г., Докучаев А. Я., Газеев В. М., Гурбанова О. А. Аномально высокие содержания благородных металлов в отходах Фиагдонской обогатительной фабрики: возможный новый для Северного Кавказа золото-платиноидный с полиметаллами тип оруденения.

нения, локализованный в ранне-среднеюрских черных сланцах. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №2. – С. 6-21. DOI: 10.46698/VNC.2021.41.26.001

6. Гусев А.И. Петрофациальные типы ниже-среднеюрских песчаников Северного Кавказа и геодинамические обстановки их формирования. // Тр. Даг., науч., центра АН СССР, ин-т Геол. – 1990. – С. 54-64.

7. Гусев Г.С., Кудрявцев Ю.К., Гушин А.В., и др. Геохимическая и металлогеническая специализация структурно-вещественных комплексов. – СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. – 514 с.

8. Корсаков С.Г., Семенуха И.Н., Горбова С.М. и др. Государственная геологическая карта РФ Лист L-37-XXXIV (Туапсе). – СПб.: ВСЕГЕИ, 2002. – 164 с.

9. Ломизе М.Г. Вулканизм Северо-Западного Кавказа и его связь с тектоникой. – М.: Изд-во МГУ, 1969. – 220 с.

10. Ломизе М.Г., Суханов М.К. Дайковый пояс Большого Кавказа: среднеюрская задуговая структура. // Бюл. Моск. О-ва Испытателей природы. Отд. Геол. – 2006. – Т. 81. Вып. 6. – С. 9-15.

11. Никишин А.М., Фокин П.Л., Тихомиров Е.Ю. и др. 400 миллионов лет геологической истории южной части Восточной Европы. – М.: ГЕОКАРТ. ГЕОС, 2005. – 351 с.

12. Туркина О.М. Лекции по геохимии магматического и метаморфического процессов. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2014. – 118 с.

13. Ширай Е.П., Филатов Е.П., Гусев С.Г., и др. Металлогения рядов геодинамических обстановок островных дуг. – М.: МПР РФ, 1999. – 411 с.

14. Школьник С.И., Резницкий Л.З. и др. Геохимия, вопросы петрогенезиса и геодинамическая типизация метавулканитов Тункинского террейна (Байкало-Хубсугульский регион). // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. №9. – С. 1013-1024.

15. Condie K. C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes. // Lithos. – 2005. – Vol. 79. – pp. 491-504.

16. Floyd P.A., Winchester J.A. Magma-type and tectonic setting discrimination using immobile elements. // Earth Planet. Sci. Lett. – 1975. – Vol. 27. – pp. 211-218.

17. McCann T., Chalont-Prat F., Saintot A. The Early Mesozoic evolution of the Western Greater Caucasus (Russia): Triassic-Jurassic sedimentary and magmatic history. // Geological Society, London, Special publications. – 2010. – Vol. 350. – pp. 181-238.

18. Meschede M.A. Method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tonalites with the Nb-Zr-Y diagram. // Chemical Geol. – 1986. – Vol. 56. – pp. 109-185.

19. Pearce J.A., Norry M.J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rock. // Contrib. Mineral. Petrol. – 1979. – Vol. 69. – pp. 33-47.

20. Pearce J.A., Harris N.B. W., Tindle A. G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. // J. Petrol. – 1984. – Vol. 25. – pp. 956-983.

21. Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts. // Geol. Spec. Publ. – 1989. – No. 42. – pp. 313-345.

## References

1. Bogatkov O.A., Tsvetkov A.A. Magmatic evolution of island arcs. Moscow. Nauka, 1988. 241 p. (In Russ.)
2. The Greater Caucasus in the Alpine Epoch (Ed. By Yu. G. Leonov). Moscow. GEOS, 2007. 368 p. (In Russ.)
3. Borsuk A.M. Petrology of Mesozoic igneous complexes of the western end of the Main Caucasian Ridge. Moscow. Nauka, 1963. 160 p. (In Russ.)
4. Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Kondrashov I.A. Mesozoic subalkaline rocks of the Central North Caucasus: geodynamic typification, geochemistry and mineralogy. Geology and Geophysics of Russian South, 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 47-62. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36479. (In Russ.)



5. Gurbanov A. G., Dokuchaev A. Ya., Gazeev V. M., Gurbanova O. A. Abnormally high content of noble metals in wastes of the Fiagdon concentration plant: a possible new type of mineralization for the North Caucasus is gold-platinoid with base metals, localized in the Early-Middle Jurassic black shales. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 6-21. DOI: 10.46698/VNC.2021.41.26.001 (In Russ.)
6. Gusev A. I. Petrofacies types of the Lower – Middle Jurassic sandstones of the North Caucasus and geodynamic settings of their formation. In: *Proceedings of DSC of the AS of the USSR, Institute of Geol.*, 1990. pp. 54-64. (In Russ.)
7. Gusev G. S., Kudryavtsev Yu. K., Gushchin A. V., et al. Geochemical and metallogenic specialization of structural-material complexes. Saint Petersburg. VSEGEI, 1999. 514 p. (In Russ.)
8. Korsakov S. G., Semenukha I. N., Gorbova S. M., et al. State geological map of the RF Sheet L-37-XXXIV (Tuapse). Saint Petersburg. VSEGEI, 2002. 164 p. (In Russ.)
9. Lomize M. G. Volcanism of the Northwest Caucasus and its relationship with tectonics. Moscow. MSU, 1969. 220 p. (In Russ.)
10. Lomize M. G., Sukhanov M. K. Dyke belt of the Greater Caucasus: Middle Jurassic back-arc structure. *Byul. Mosk. O-va Isp. prirody. Otd. Geol.*, 2006. Vol. 81. Issue 6. pp. 9-15. (In Russ.)
11. Nikishin A. M., Fokin P. L., Tikhomirov E. Yu., et al. 400 million years of geological history of the southern part of Eastern Europe. Moscow. GEOKART. GEOS, 2005. 351 p. (In Russ.)
12. Turkina O. M. Lectures on the geochemistry of magmatic and metamorphic processes. Novosibirsk. RITs NSU, 2014. 118 p. (In Russ.)
13. Shirai E. P., Filatov E. P., Gusev S. G., et al. Metallogeny of the series of geodynamic environments of island arcs. Moscow. RF Ministry of Natural Resources, 1999. 411 p. (In Russ.)
14. Shkolnik S. I., Reznitsky L. Z., et al. Geochemistry, issues of petrogenesis and geodynamic typification of metavolcanics of the Tunkinsky terrane (Baikal-Khubsugul region). *Geology and Geophysics*, 2009. Vol. 50. No. 9. pp. 1013-1024. (In Russ.)
15. Condie K. C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes. *Lithos*, 2005. Vol. 79. pp. 491-504.
16. Floyd P. A., Winchester J. A. Magma-type and tectonic setting discrimination using immobile elements. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1975. Vol. 27. pp. 211-218.
17. McCann T., Chalont-Prat F., Saintot A. The Early Mesozoic evolution of the Western Greater Caucasus (Russia): Triassic-Jurassic sedimentary and magmatic history. Geological Society, London, Special publications, 2010. Vol. 350. pp. 181-238.
18. Meschede M. A. Method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tonalites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geol.* 1986. Vol. 56. pp. 109-185.
19. Pearce J. A., Norry M. J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rock. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1979. Vol. 69. pp. 33-47.
20. Pearce J. A., Harris N. B. W., Tindle A. G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.* 1984. Vol. 25. pp. 956-983.
21. Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts. *Geol. Spec. Publ.*, 1989. No. 42. pp. 313-345.

УДК 551.243.6 (470.56)

DOI: [10.46698/VNC.2021.67.24.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.67.24.003)

Оригинальная статья

## Соляные структуры осадочного чехла Русской платформы как отражение возможных геодинамически активных очагов генерации углеводородов в фундаменте (на примере юго-запада Оренбургской области)

Е. А. Данилова 

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 620016, г. Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15,  
e-mail: yevgeniya.antoninovna@bk.ru

Статья поступила: 03.08.2021, доработана: 30.08.2021, принята к публикации: 08.09.2021

**Резюме: Актуальность работы.** В 2021 году А. А. Драгуновым при помощи системно-геодинамического дешифрирования были выявлены Восточно-Оренбургский и Западно-Оренбургский геодинамически активные очаги генерации углеводородов Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения. Было предположено, что ряд малых залежей юго-запада Оренбургской области также получают от них подпитку. **Целью представленной работы** являлась попытка проследить вышеуказанные очаги генерации углеводородов в фундаменте и осадочном чехле на основе переинтерпретации временных разрезов региональных сейсмических профилей. **Методы работы.** Выделение тектонических нарушений проводилось вручную с применением авторских методических приемов приближений и последовательной детализации. После чего выполнялось системное обобщение и анализ полученных результатов в свете перспектив нефтегазоносности юго-запада Оренбургской области. **Результаты работы.** В результате работ было рассмотрено глубинное строение очагов, отмечены сейсмогеологические особенности их обнаружения. В местах картирования очагов генерации на временных разрезах зафиксированы неотектонические разломы «цветкового» типа, хаотическая вертикально направленная локально усиленная сейсмическая запись под ними ниже отражающего горизонта, отождествляемого с породами фундамента. Прослежена связь глубинных разломов и связанных с ними новейших оперяющих разломов с солянокупольными структурами кунгурского возраста. По результатам комплексного геологического анализа структурных построений выявлена схематическая сеть неотектонических разломов фундамента, судя по которой, Оренбургское нефтегазоконденсатное месторождение и другие, более мелкие месторождения углеводородов и выявленные сейсморазведочными работами структуры юго-запада Оренбургской области имеют закономерное распределение внутри крупной радиально-концентрической структуры диаметром около 180 км. Данная структура, вероятно, представляет собой зону разуплотнения в фундаменте, в пределах которой в осадочном чехле образовались перспективные в плане нефтегазоносности структуры. Уникальное и самое крупное в пределах юго-запада Оренбургской области Оренбургское месторождение находится в центре макроструктуры, являясь, возможно, результатом работы главных очагов генерации УВ в фундаменте. Вдоль радиальных и концентрических разломов сосредоточены более мелкие месторождения углеводородов. Кроме того, Оренбургское месторождение приурочено к зоне наложения двух концентров, что, возможно, является значительным фактором при обнаружении крупных месторождений. В качестве выводов даны рекомендации для дальнейших исследований и поиска возможных геодинамически активных очагов генерации углеводородов в пределах Русской платформы.

**Ключевые слова:** Русская платформа, юго-запад Оренбургской области, переинтерпретация временных сейсмических разрезов, геодинамически активные очаги генерации углеводородов, неотектонические сдвиговые деформации, осадочный чехол, соляные структуры, радиально-концентрические структуры фундамента, месторождения нефти и газа.

**Благодарности:** *Источник финансирования: исследования выполнены в рамках темы № АААА-А19-119072990020-6 государственного задания ИГГ УрО РАН.*

**Для цитирования:** Данилова Е. А. Соляные структуры осадочного чехла Русской платформы как отражение возможных геодинамически активных очагов генерации углеводородов в фундаменте (на примере юго-запада Оренбургской области). *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (3): 33 – 44. DOI: 10.46698/VNC.2021.67.24.003.

---

---

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

---

---

[DOI: 10.46698/VNC.2021.67.24.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.67.24.003)

Original paper

## Salt structures of the sedimentary cover of the Russian platform as a reflection of possible geodynamically active foci of hydrocarbon generation in the basement (on the example of the south-west of the Orenburg region)

E. A. Danilova 

Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Geology and Geochemistry named after Academician A. N. Zavaritsky of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 15 Akademika Vonsovsky str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation, e-mail: yevgeniya. antoninovna@bk.ru.

*Received: 03.08.2021, revised: 30.08.2021, accepted: 08.09.2021*

**Abstract: Relevance.** In 2021, A. A. Dragunov, using system-geodynamic decoding, identified the East-Orenburg and West-Orenburg geodynamically active centers of hydrocarbon generation of the Orenburg oil and gas condensate field. It was assumed that a number of small deposits in the south-west of the Orenburg region also receive recharge from them. **The aim of the presented work** was an attempt to trace the above-mentioned sources of hydrocarbon generation in the foundation and sedimentary cover on the basis of reinterpretation of time sections of regional seismic profiles. **Methods.** The selection of tectonic disturbances was carried out manually using the author's methodological techniques of approximations and sequential detailing. After that, a systematic generalization and analysis of the results obtained was carried out in the light of the prospects for oil and gas potential of the south-west of the Orenburg region. **Results.** As a result of the work, the deep structure of the foci was considered, the seismogeological features of their detection were noted. Neotectonic faults of the "flower" type, chaotic vertically directed locally enhanced seismic recording under them below the reflecting horizon identified with the basement rocks were recorded in the places of mapping the generation centers on time sections. The connection of deep faults and the newest feathering faults associated with them with salt-dome structures of the Kungur age is traced. According to the results of a comprehensive geological analysis of structural structures, a schematic network of neotectonic basement faults has been identified, judging by which the Orenburg oil and gas condensate field and other smaller hydrocarbon deposits and the

structures identified by seismic surveys in the southwest of the Orenburg region have a regular distribution within a large radial-concentric structure with a diameter of about 180 km. This structure probably represents a zone of decompression in the foundation, within which promising structures in terms of oil and gas potential were formed in the sedimentary cover. The Orenburg deposit, which is unique and the largest within the south-west of the Orenburg Region, is located in the center of the macrostructure, possibly being the result of the work of the main centers of HC generation in the foundation. Smaller hydrocarbon deposits are concentrated along the radial and concentric faults. In addition, the Orenburg field is confined to the zone of overlap of two centers, which is probably a significant factor in the discovery of large deposits. As conclusions, recommendations are given for further research and search for possible geodynamically active centers of hydrocarbon generation within the Russian platform.

**Keywords:** The Russian platform, the southwest of the Orenburg region, reinterpretation of temporary seismic sections, geodynamically active centers of hydrocarbon generation, neotectonic shear deformations, sedimentary cover, salt structures, radial-concentric basement structures, oil and gas fields.

**Acknowledgments:** *Funding: the research was carried out within the framework of the topic № AAAA-A19-119072990020-6 of the state assignment of the IGG UB RAS.*

**For citation:** Danilova E. A. Salt structures of the sedimentary cover of the Russian platform as a reflection of possible geodynamically active foci of hydrocarbon generation in the basement (on the example of the south-west of the Orenburg region). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2021. 11 (3): 33 – 44. DOI: 10.46698/VNC.2021.67.24.003.

## Введение

На рубеже XX и XXI веков российские геологи стали замечать подток новых порций углеводородов (УВ) в залежи, находящиеся в эксплуатации более 50 лет, и связь нефтегазоносности осадочного чехла Русской платформы с блоковым строением фундамента. Это дало начало многим идеям об очагах генерации УВ и о глобальном геохимическом круговороте вещества в природе [Баренбаум, 2019; Гаврилов, 2008; Муслимов, Плотникова, 2018; Етирмишли и др., 2019]. Концепция А. А. Драгунова о развитии геодинамически активных очагов генерации УВ [Драгунов и др., 2017; Самарцев и др., 2021] не исключает основ осадочно-миграционной концепции преобразования органического вещества в УВ, но указывает на ведущую роль глубинных разломов в формировании месторождений, и на то, что нефть и газ могут быть возобновляемыми природными ископаемыми. Автор считает, что в залежи УВ попадают по субвертикально направленным глубинным дислокациям. Для существования очагов генерации УВ, по его мнению, необходимо поступление водорастворенного метана. Последний привносится в пластовые воды в виде пузырьков газа непосредственно из нефтематеринских пород, а также с восходящими потоками флюидов. Далее метан, преобразованный в водонефтяную эмульсию, выделяется. Это происходит в особых очагах так называемой термобарической нестабильности, которые в свою очередь зависят от Лунно-Солнечных приливов. Роль каналов, по которым к геодинамически активным очагам генерации УВ поступают пластовые воды, выполняют взаимосвязанные между собой системы разломов фундамента. По космоснимкам и совокупности различных ландшафтных индикаторов автор трассирует геодинамически активные зоны нарушений (ГАЗН) и выполняет системно-геодинамическое моделирование месторождений [Драгунов и др., 2017; Самарцев и др., 2021]. Так, в 2017 году А. А. Драгуновым и др. было показано, что в областях взаимного наложения ГАЗН различных порядков и простираний отмечается улучшение продуктивности коллекторов бобриковского, тиманского и пашийского горизонтов крупнейшего нефтяного месторождения Русской платформы – Ромашкинского [Драгунов и др., 2017]. В 2021 году с помощью системно-геодинамического дешифрирования была впервые предпринята попытка закартировать основные очаги генерации УВ уникального Оренбургского нефте-

газоконденсатного месторождения (ОНГКМ), которое было открыто в карбонатах каменноугольно-нижнепермского возраста еще в 60-х годах прошлого столетия [Самарцев и др., 2021]. По результатам этих работ А. А. Драгуновым и др. выявлен крупный Восточно-Оренбургский очаг генерации УВ и менее крупный Западно-Оренбургский (рис. 1).

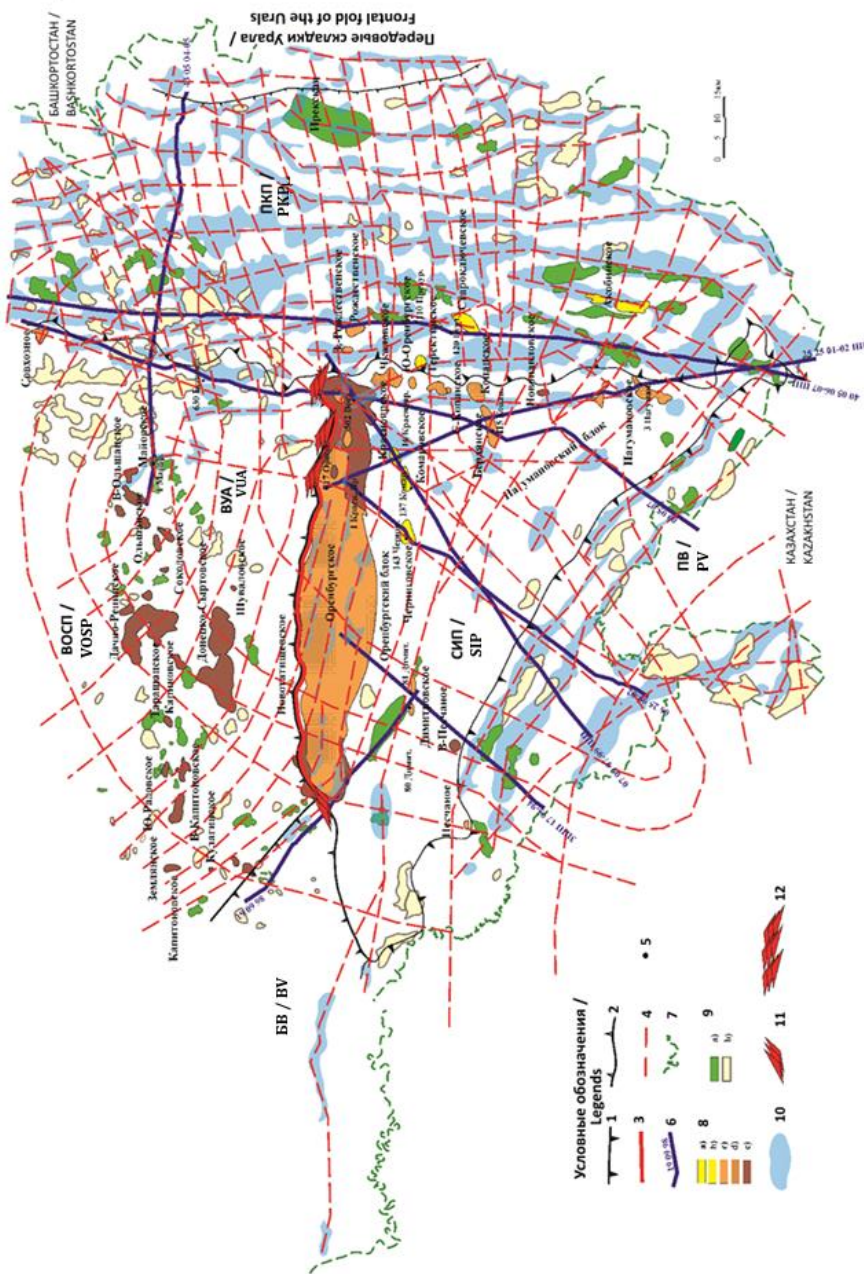
Юго-запад Оренбургской области в современном тектоническом плане представлен Волго-Уральской антеклизой (ВУА), Прикаспийской впадиной (ПВ) и Предуральским краевым прогибом (ПКП). По геофизическим данным ВУА подразделяется на Восточно-Оренбургское сводовое (ВОСП) и Соль-Илецкое (СИП) поднятия по субширотному Оренбургскому разлому. СИП в свою очередь расчленяется на блоки: Оренбургский северный и Нагумановский южный. Оренбургский блок поднят относительно Нагумановского на 1000-1600 м и характеризуется наиболее высоким положением подсолевого рельефа среди окружающих его тектонических структур. С севера к СИП примыкает Бузулукская впадина (БВ) (рис. 1). В 2021 году А. А. Драгуновым было предположено, что ОНГКМ и ряд малых залежей в низкочемких породах нижнепермского возраста СИП и зоны его сочленения с ПКП, расположенных к югу и к юго-востоку, получают от них подпитку (рис. 1). Нефть имеет меньшую миграционную способность по сравнению с газом. Поэтому на месторождении она локализуется в основном в западной и восточной частях, вблизи выявленных очагов. А газ, который обладает высокой проникающей способностью, концентрируется в центральной части ОНГКМ. Значительную роль при распределении углеводородного сырья по территории месторождения играет глубинный Оренбургский разлом [Самарцев и др., 2021] (рис. 1).

Целью представленной работы является попытка проследить вышеуказанные очаги генерации УВ, имеющие геодинамическую активность, в фундаменте (Ar – Pr) и осадочном чехле ( $O_1 - Q$ ), выполнив переинтерпретацию временных разрезов сейсмических профилей и применив авторские методические приемы трассирования тектонических дислокаций. К сожалению, информации о породах фундамента на юго-западе Оренбуржья крайне мало из-за значительных глубин его залегания. На юго-западе Оренбуржья фундамент вскрыт скважинами лишь на территории ВОСП и представлен гнейсами, перекрытыми корой выветривания мощностью до 20 м. Сейсморазведочные работы МОГТ 3D, проведенные на ОНГКМ и некоторых других месторождениях в 2000-х годах, практически не дают представления о строении фундамента, так как ограничены глубинами залегания осадочного чехла, мощность которого на изучаемой территории возрастает с севера на юг. На ВОСП мощность чехла составляет около 1800 м, в районе Нагумановского блока – 6000 м и более. Фундамент ПКП по меридиональным разломам погружается от бортовых зон к центральной части на глубину от 6 до 20 км. ПВ, которая в пределах юго-запада Оренбургской области отображена своим северо-восточным обрамлением, опущена относительно ВУА на глубину 6000 м и более.

Более полное представление о строении фундамента дают результаты региональных сейсморазведочных работ. В 2020 году нами было уточнено структурно-тектоническое строение изучаемой территории при переинтерпретации некоторых временных разрезов сейсмических профилей, пересекающих ОНГКМ, ПКП, СИП и ПВ [Данилова, 2020]. Было установлено, что многие месторождения нефти и газа, а также выявленные сейсморазведкой структуры являются приразломными горстовидными поднятиями и связаны с коллекторами трещинного типа. Предположено, что во время последней тектонической активизации весь юго-запад Оренбургской области подвергся сдвигам, которые сопровождалось формированием в осадочном чехле неотектонических структур «цветка» [Данилова, 2020]. Представленная вашему вниманию работа, является продолжением вышеуказанных исследований.

д) нефтяные. 9. Структуры в подсолончатых отложениях: а) подготовленные, б) выявленные. 10. Соляные структуры вулканического возраста. 11. Западно-Оренбургский геодинамически активный очаг генерации УВ [Самарцев и др., 2021]. 12. Восточно-Оренбургский геодинамически активный очаг генерации УВ [Самарцев и др., 2021].

**Fig. 1. Structural-tectonic scheme of the south-west of the Orenburg region (based on the materials by N. A. Ivanova, 2010 and E. A. Danilova, 2020 as amended). Legend:**  
 1. Boundaries of the superorder structures of the Russian Platform basement. VUA – Volga-Ural anticline; PV – Peri-Caspian depression; PKP – Pre-Ural fore deep. 2. Boundaries of the first-order structures in the sedimentary cover. YOSP – East Orenburg arch uplift; BV – Buzuluk depression; SIP – Sol-Iletsks uplift. 3. Orenburg depression; SPP – schematic network of probable faults. 4. Schematic network of probable faults. 5. Wells. 6. Lines of seismic profiles and their numbers. 7. Border of the Orenburg region. 8. Deposits: a) gas, b) gas condensate, c) gas and oil, d) oil and gas condensate; e) oil. 9. Structures in subsalt sediments: a) developed, b) identified. 10. Salt structures of the Kungurian age. 11. West Orenburg geodynamically active source of hydrocarbon generation [Samarisev et al., 2021]. 12. East Orenburg geodynamically active source of hydrocarbon generation [Samarisev et al., 2021].



**Рис. 1. Структурно-тектоническая схема юго-запада Оренбургской области (по материалам Н. А. Ивановой, 2010 и Е. А. Даниловой, 2020 с изменениями). Условные обозначения:** 1. Границы надпорядковых структур фундамента Русской платформы. ВУА – Волго-Уральская антеклизы; ПУВ – Прикаспийская впадина; ПКП – Предуральский краевой прогиб. 2. Границы структур первого порядка в осадочном чехле. ВОСП – Восточно-Оренбургское сводовое поднятие; БВ – Бузукская впадина; СИП – Соль-Илецкое поднятие. 3. Оренбургский разлом. 4. Схематическая сеть предполагаемых разломов. 5. Скважины. 6. Линии сейсмических профилей и их номера. 7. Граница Оренбургской области. 8. Месторождения: а) газовые, б) газоконденсатные, в) газоконденсатные, с) газоконденсатные, д) нефтяные, е) газоконденсатные.

## Методы работы

Для изучения глубинного строения очагов генерации УВОНГКМ и ближайших к нему залежей была проведена переинтерпретация временных региональных сейсмических профилей ЗШП 1793-04 (Травкина Н. А., 1994), 190998 (Альберт А. К., 1999), 070997-99 ШП (Альберт А. К., 1999), 252501-02 ШП (Вотинцева Н. С., 2002), 062599-02 (Альберт А. К., 2002), 43052004-05 (Кондрашова Н. В., 2005), 400506-07 ШП (Кондрашова В. Н., 2007), 090507 (Пятаева Л. А., 2008) (рис. 1). Выполнены системное обобщение и анализ полученных результатов в свете перспектив нефтегазоносности юго-запада Оренбургской области.

Временные разрезы представляют собой сложную волновую картину, но материал признан кондиционным. Выделение тектонических нарушений проводилось вручную по авторской методике, основанной на использовании приема приближений и последовательной детализации. С возрастанием масштаба увеличивалась детальность интерпретации. Крупные глубинные разломы выделялись в мелком масштабе. По мере увеличения масштаба выявлялись более мелкие деформации. Основные признаки обнаружения тектонических нарушений на временном сейсмическом разрезе – это изменение основных черт напластования пород, нарушение гладкости границ, прерывание осей синфазности регулярных отраженных волн и их смещение, исчезновение или ухудшение корреляции волн, возникновение наклонных осей синфазности, беспорядочное поведение фаз, усиление нерегулярных волн и др. Опираясь на них, если это было целесообразно, выполнялась отбраковка менее значимых элементов модели интерпретации. С учетом выделенных деформаций производилась детальная окончательная корреляция основных отражающих горизонтов (Данилова Е. А. Перспективы нефтегазоносности приразломных зон трещиноватости Оренбургского Приуралья: автореф... дис. кан. наук, 25 с.).

## Результаты работы

При переинтерпретации в породах фундамента, подсолевого ( $O_1 - P_{1ar}$ ) и частично надсолевого ( $P_2 - Q$ ) комплексов осадочного чехла изучаемой территории снова выявляется густая сеть разломов, напоминающих «цветки» из-за наличия основных глубинных и связанных с ними подчиненных малоамплитудных «оперяющих» деформаций (рис. 2-3). Некоторые новейшие «оперяющие» нарушения трассируются из подсолевых отложений в надсолевые. Отмечается связь глубинных разломов фундамента с солянокупольными структурами кунгурского возраста.

В местах картирования основных Западно- и Восточно-Оренбургских геодинамически активных очагов генерации УВ на временных разрезах (профили 190998, 070997-99 ШП, 090507) помимо зон разломов «цветкового» типа и увеличения мощности соляных структур отмечается хаотическая вертикально направленная локально усиленная сейсмическая запись под ними намного ниже отражающего горизонта, отождествляемого с породами фундамента (рис. 2-3). На временных разрезах профилей ЗШП 1793-04, 252501-02 ШП, 062599-02 и 400506-07 ШП, пересекающих мелкие месторождения на юге и юго-востоке от ОНГКМ, прослеживаются аналогичные сейсмические признаки, связанные с залежами Димитровского, Красноярского, Комаровского, Черниговского, Копанского, Бердянского, Нагумановского, Рождественского, Теректинского и Староключевского месторождений нефти и газа. Соли над структурами зачастую образуют купол (рис. 3), реже немного «приподнимаются» в пределах блоков (рис. 2), ограниченных тектоническими нарушениями. Судя по интерпретации сейсмического разреза по профилю 070997-99 ШП Комаровское и Красноярское газоконденсатные месторождения, считающиеся отдельными залежами, представляют собой единую (рис. 3). Майорское мелкое месторождение УВ, находящееся севернее от Восточно-Оренбургского геодинамиче-

ски активного очага генерации УВ и практически на одном с ним меридиане, имеет похожие особенности строения на временном разрезе сейсмического профиля 43 05 2004-05.

Если предположить, что вышеперечисленные признаки на временных разрезах сейсмических профилей свидетельствуют о наличии очагов генерации УВ, то напрашиваются следующие выводы. Во-первых, новые порции УВ поступают в залежи не просто по субвертикальным нарушениям, а по разветвленной сети наклонных глубинных разломов фундамента и приуроченным к ним разнонаправленным неотектоническим оперяющим нарушениям. Во-вторых, по сейсмическим разре-

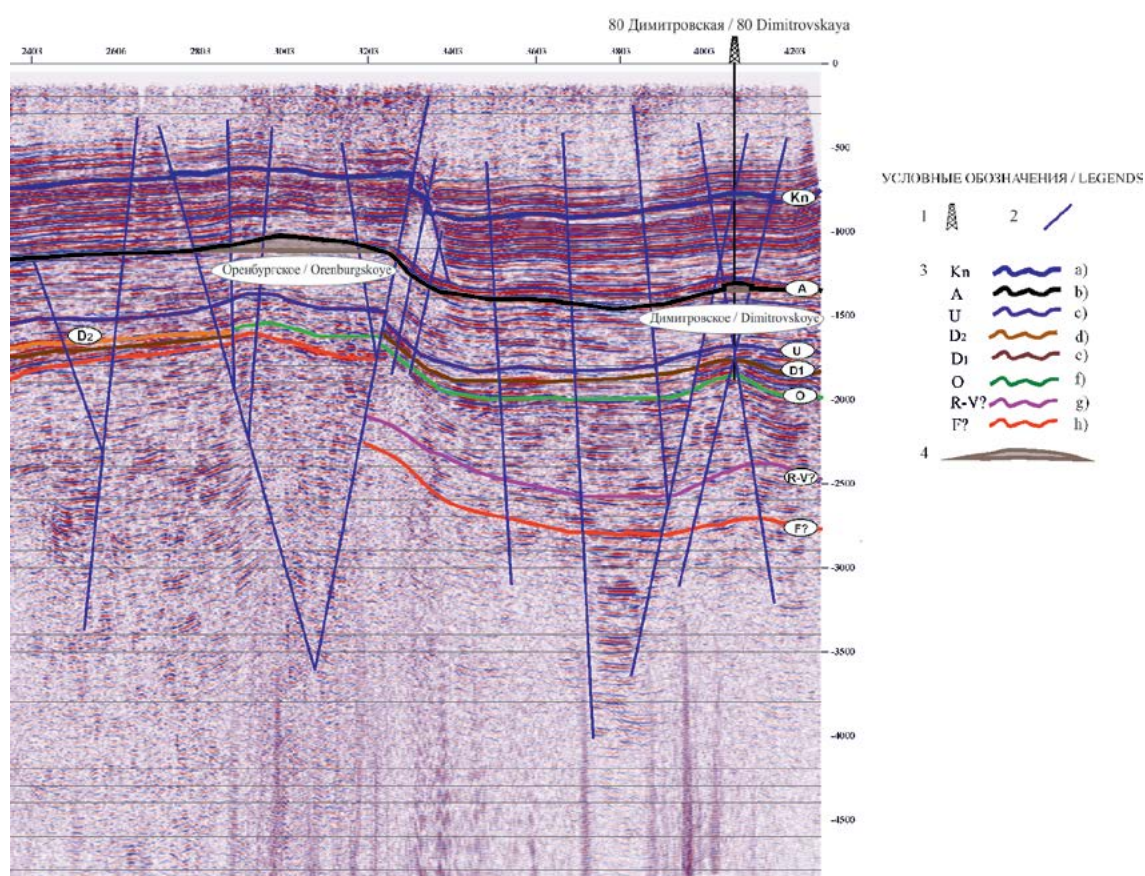


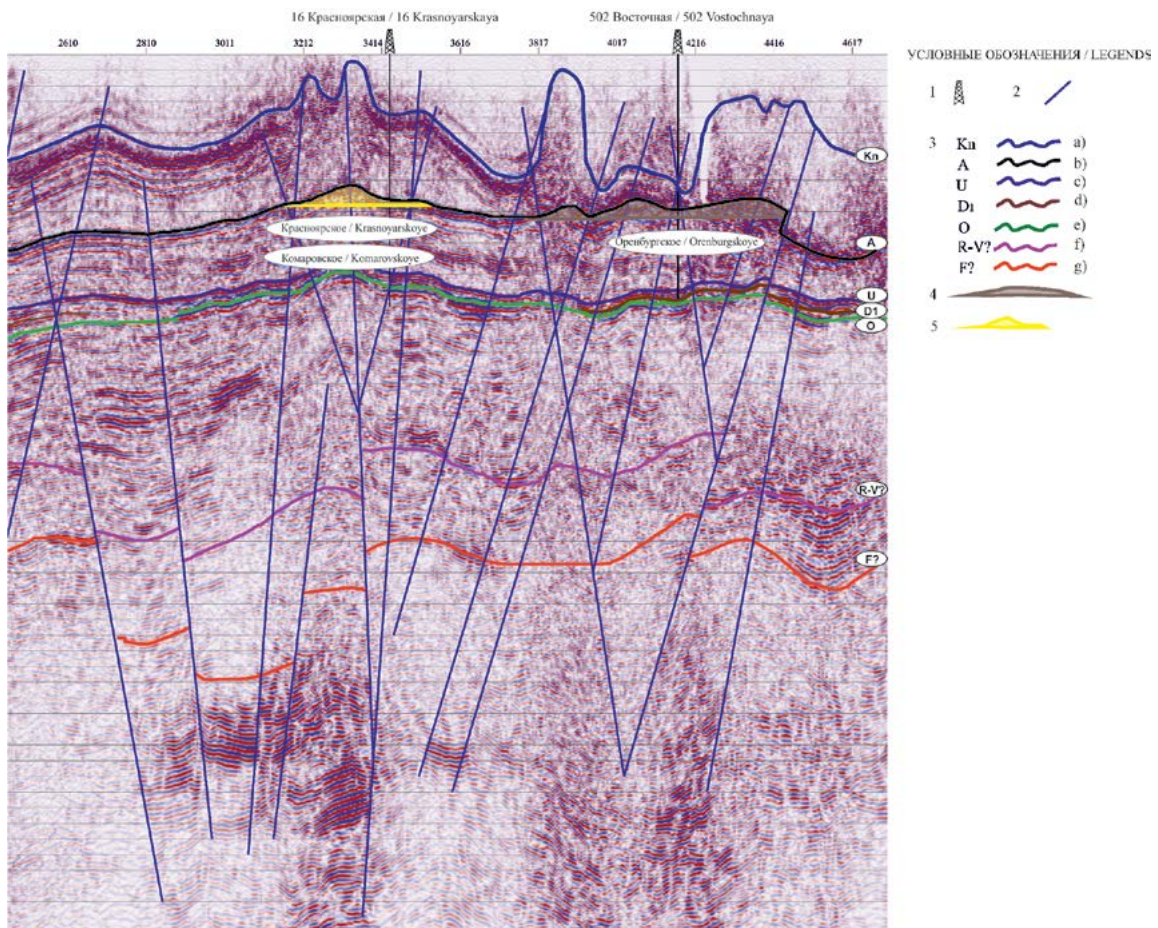
Рис. 2. Западно-Оренбургский геодинамически активный очаг генерации УВ ОНГКМ. Выделение тектонических нарушений (авторская интерпретация). Фрагмент временного сейсмического разреза 190998 (по материалам Альберта А. К., 1999). Условные обозначения: 1. Скважина глубокого бурения. 2. Предполагаемые тектонические нарушения. 3. Сейсмические горизонты: а) кровля кунгурского яруса нижней перми, б) кровля подсолевых отложений, с) кровля бобриковского горизонта, d) кровля размывтой поверхности среднего девона, e) кровля отложений нижнего девона, f) кровля ордовикских отложений, g) поверхность рифей-вендских отложений, h) поверхность кристаллического фундамента. 4. Оренбургское и Димитровское нефтегазоконденсатные месторождения /

Fig 2. West Orenburg geodynamically active source of hydrocarbon generation at the Orenburg oil and gas condensate deposit (OOGCD). Identification of tectonic faults (author's interpretation). Fragment of seismic section 190998 (based on the materials of Albert A. K., 1999). Legend: 1. Deep-drilling well. 2. Probable tectonic faults. 3. Seismic horizons: a) the roof of the Kungurian stage of the Lower Permian, b) the roof of the subsalt deposits, c) the roof of the Bobrikovian horizon, d) the roof of the eroded surface of the Middle Devonian, e) the roof of the Lower Devonian deposits, f) the roof of the Ordovician deposits, g) the surface of the Riphean – Vendian deposits, h) the surface of the crystalline basement. 4. Orenburg and Dimitrovskoe oil and gas condensate fields



зам трудно предполагать, какие очаги являются основными, какие второстепенными. В-третьих, соляные структуры маркируют возможные зоны генерации УВ фундамента в осадочном чехле.

То, что связь соляных структур Русской платформы с тектоническими элементами очевидна, отмечают многие исследователи [Иванова, Сафонов, 2010]. Связь разломов с месторождениями нефти и газа геологи отмечают во всем мире [McKirdy, 2006; Davison, Barreto, 2009; Grillot, 1984; Mann et al., 2003; Naumann, Sakariassen,



*Рис. 3. Восточно-Оренбургский геодинамически активный очаг генерации УВ ОНГКМ. Выделение тектонических нарушений (авторская интерпретация). Фрагмент временного сейсмического разреза 07099-99 ШП (по материалам Альберта А. К., 1999). Условные обозначения: 1. Скважина глубокого бурения. 2. Предполагаемые тектонические нарушения. 3. Сейсмические горизонты: а) кровля кунгурского яруса нижней перми, б) кровля подсолевых отложений, с) кровля бобриковского горизонта, d) кровля отложений нижнего девона, e) кровля ордовикских отложений, f) поверхность рифей-вендских отложений, g) поверхность кристаллического фундамента. 4. Оренбургское нефтегазоконденсатное месторождение. 5. Красноярское и Комаровское газоконденсатные месторождения (единая залежь?) /*

*Fig. 3. East-Orenburg geodynamically active source of hydrocarbon generation at the OOGCD. Identification of tectonic faults (author's interpretation). Fragment of the seismic section 07099-99 ShP (based on the materials of Albert A. K., 1999). Legend: 1. Deep-drilling well. 2. Probable tectonic faults. 3. Seismic horizons: a) the roof of the Kungurian stage of the Lower Permian, b) the roof of the subsalt deposits, c) the roof of the Bobrikovian horizon, d) the roof of the Lower Devonian deposits, e) the roof of the Ordovician deposits, f) the surface of the Riphean-Vendian deposits, g) the surface of the crystalline foundation. 4. Orenburg oil and gas condensate field. 5. Krasnoyarskoe and Komarovskoe gas condensate fields (single deposit?) /*

2019; Saadallah, 2019]. В юго-западной части Оренбургской области эту корреляцию проводили В. М. Горожанин, Е. Н. Горожанина, Г. В. Леонов, А. Н. Светлакова, А. Г. Соколов и другие [Горожанина и др., 2009; Соколов, 2010]. Значит, связь «разлом – месторождение – соляная структура» вполне можно использовать при картировании очагов генерации УВ. Если наметить основные направления расположения соляных гряд и перемычек между ними в юго-западной части Оренбургской области по структурным построениям [Данилова, 2020; Иванова, Сафонов, 2010], при этом учесть расположение, конфигурацию месторождений УВ и выявленных сейсморазведочными работами структур, в первом приближении можно получить схематическую сеть разломов фундамента, сформированную, вероятно, в мезо-кайнозойское время (рис. 1).

Судя по схематической сети разломов, ОНГКМ и другие более мелкие месторождения УВ и выявленные сейсморазведочными работами структуры ВУА, ПС и западного борта ПКП имеют закономерное распределение внутри радиально-концентрической структуры I диаметром около 180 км (рис. 5). Кроме того, ОНГКМ, находясь «в сердце» центра I, наряду с другими месторождениями и структурами ВОСП и северной части Оренбургского Приуралья входит в зону распространения центра II диаметром более 250 км и приурочено к его наружной окружности.

Радиально-концентрические структуры фундамента, по мнению многих исследователей, связаны с процессами очаговой геодинамики, мантийного диапиризма, вулканизма и считаются перспективными объектами при поисково-разведочных работах на алмазы, редкометалльные карбонатиты, графиты, каменные угли и углеводороды [Лукиянов, 2000; Муравьев, 1983; Смирнова, 1997; Харченко, 2006]. Концентры представляют собой зоны разуплотнения, насыщенные флюидами. При современных тектонических движениях в них активизируется вертикальная и горизонтальная миграция, что может провоцировать в том числе возобновляемость запасов нефти и газа на отработанных месторождениях. Центры радиально-концентрических структур являются очагами генерации УВ, имеющими геодинамическую активность. Зоны радиальных и концентрических разломов – путями миграции УВ. Районы пересечения нарушений с трещинными коллекторами, перекрытые надежными флюидоупорами в виде кунгурских солей, могут стать возможными ловушками [Смирнова, 1997; Харченко, 2006].

Результаты настоящей работы свидетельствуют о том, что неотектоническим сдвиговым деформациям с возможным образованием радиально-концентрических структур в фундаменте подвергся весь юго-запад Оренбуржья. Благодаря чему в осадочном чехле образовались перспективные в плане нефтегазоносности структуры. Так, уникальное и самое крупное в пределах юго-запада Оренбургской области ОНГКМ находится в центре макроструктуры, являясь, возможно, результатом работы главных очагов генерации УВ в фундаменте. Вдоль радиальных и концентрических разломов сосредоточены более мелкие месторождения УВ. Кроме того, ОНГКМ приурочено к зоне наложения двух концентров, что, возможно, является значительным фактором при обнаружении крупных месторождений.

## Выводы

Таким образом, в результате переинтерпретации обнаружено, что в местах картирования А. А. Драгуновым и др. основных геодинамически активных очагов генерации УВ на временных разрезах региональных сейсмических профилей фиксируются неотектонические разломы «цветкового» типа, увеличение мощности соляных структур над и хаотическая вертикально направленная локально усиленная сейсмическая запись под ними. Аналогичные признаки отмечаются и в районах простираения некоторых более мелких залежей УВ юго-запада Оренбургской

области. По временным разрезам региональных сейсмических профилей трудно определить, являются ли очаги генерации геодинамически активными, основными или второстепенными. С целью тщательного исследования подобных природных явлений рекомендуем применять все возможные геолого-геофизические, геохимические и дистанционные методы, бурение, проводить мониторинг современных геотектонических процессов, выполнять сейсморазведочные исследования МОГТ-3D, распространяющиеся на глубину ниже залегания фундамента. Изучение соляных структур осадочного чехла, закономерностей их распространения по площади может стать значительным подспорьем при картировании перспективных в плане нефтегазоносности радиально-концентрических структур фундамента Русской платформы и других неотектонических дислокаций, с которыми связываются возможные геодинамически активные очаги генерации УВ и источники восполнения залежей, находящихся в стадии падающей добычи.

### Литература

1. Баренбаум А. А. Новые представления о происхождении нефти и газа в связи с открытием явления пополнения запасов эксплуатируемых месторождений. // Георесурсы. – 2019. – Т. 21. №4. – С. 34-39.
2. Гаврилов В. П. Механизмы естественного восполнения запасов на нефтяных и газовых месторождениях. // Геология нефти и газа. – 2008. – № 1. – С. 57-65.
3. Горожанина Е. Н., Горожанин В. М., Ефимов А. Г., Побережский С. М., Светлакова А. Н. Геологическое строение западной части Предуральяского прогиба на территории Оренбургской области и структурная позиция нефтегазоносных комплексов. // Геологический сборник. №8. Уфа: Дизайн Полиграф Сервис, 2008. – С. 221-226.
4. Данилова Е. А. Присдвиговые цветковые структуры юго-запада Оренбургской области. // Региональная геология и металлогения. – 2020. – Т. 82. – С. 60-68.
5. Драгунов А. А., Мухамадиев Р. С., Чернов С. В. Влияние геодинамических процессов на фильтрационно-емкостные свойства геологической среды (на примере Ромашкинского месторождения). // Георесурсы. – 2017. – №4. – С. 319-322.
6. Етирмишли Г. Дж., Валиев Г. О., Казымова С. Э., Исмаилова С. С., Казымов И. Э. Технологии добычи остаточной нефти. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 1. – С. 84-96. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26790.
7. Иванова Н. А., Сафонов А. О. Особенности строения галогенных толщ зоны сочленения Прикаспийской впадины и Волго-Уральской антеклизы на территории Оренбуржья. // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2010. – №61. – С. 33-41.
8. Лукьянов В. Ф. Радиально-концентрические структуры в восточной части Воронежского кристаллического массива (ВКМ). // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2000. – Вып. 9. – С. 31-37.
9. Муравьев В. В. Геодинамика и нефтегазоносность систем концентрических дислокаций литосферы. // В кн.: «Условия образования и закономерности размещения залежей нефти и газа». – Киев: Наукова Думка, 1983. – С. 121-127.
10. Муслимов Р. Х., Плотникова И. Н. Пора приступать к моделированию процессов воспроизводства запасов углеводородов на длительно эксплуатируемых месторождениях. // Моделирование геологического строения и процессов разработки – основа успешного освоения нефтегазовых месторождений: докл. на Международ. науч.-практ. конф. 4-5 сентября 2018 г. – Казань. – 2018. – С. 292-294.
11. Самарцев С. К., Данилова, Е. А., Драгунов А. А., Драгунов В. А. Геодинамически активные очаги генерации углеводородов как возможные источники восполнения залежей Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения. // Бурение и нефть. – 2021. – №4. – С. 10-13.
12. Смирнова М. Н. Нефтегазоносные кольцевые структуры и научно-методические аспекты их изучения. // Геология нефти и газа. – 1997. – №9. – С. 1-6.

13. Соколов А.Г. Выделение и трассирование тектонических нарушений по данным сейсморазведки и прогнозирование приазломных ловушек в платформенном Оренбуржье: монография. – Оренбург: ОГУ, 2010. – 205 с.
14. Харченко В.М. Природа структур центрального типа и закономерности распространения залежей углеводородов, локальных и региональных очагов землетрясений. // Вестник Северо-Кавказского технического университета. – 2006. – №2 (6). – С. 48-53.
15. Davison I., Barreto P. Exhumed portuguese oil field suggests conjugate potential. // GEOExPro. – 2019. – pp. 38-40.
16. Grillot J. C. Tectonics of Late and Post-hercynian Ages in the Western of the Iberian Plate (Portugal). // Comptesrendus de l'académie des sciences. – 1984. – Vol. 299. – pp. 665-670.
17. Mann P., Gahagan L., and Gordon M.B. Tectonic setting the world's giant oil and gas fields, in M. T. Halbouty, ed., Giant oil and gas fields of the Decade 1990-1999. // Memoirs of AAPG. – 2003. – Vol. 78. – pp. 15-105.
18. McKirdy D.M. Hydrocarbon generation and migration. // In book: The Petroleum Geology of South Australia, Vol. 2: Eromanga Basin. Edition: 2<sup>nd</sup>. Chapter: 10. Publisher: South Australia. Department of Primary Industries and Resources. / Editors: T.B. Cotton, M.F. Scardigno, J.E. Hibburt. – 2006.
19. Naumann S., Sakariassen R. Diving deeper to reveal hydrocarbon potential in the Barents sea. // GEOExPro. – 2019. – pp. 20-24.
20. Saadallah A. A proposed new tectonic model for the Northern Algerian Alpine Region based on studies of the Internal Zone rejects the previous model and suggests ideas for new hydrocarbon traps and prospects. // GEOExPro. – 2019. – pp. 14-18.

## References

1. Barenbaum A.A. New ideas about the origin of oil and gas in connection with the discovery of the phenomenon of replenishment of reserves of exploited fields. Georesources, 2019. Vol. 21. No. 4. pp. 34-39. (In Russ.)
2. Gavrilov V.P. Mechanisms of natural replenishment of reserves in oil and gas fields. Geology of Oil and Gas, 2008. No. 1. pp. 57-65. (In Russ.)
3. Gorozhanina E. N., Gorozhanin V. M., Efimov A. G., Berezhsky S. M., Svetlakova A. N. The geological structure of the western part of the Pre-Ural trough on the territory of the Orenburg region and the structural position of oil and gas complexes. Geological collection No. 8. Ufa. Designpoligrafservice, 2009. pp. 221-226. (In Russ.)
4. Danilova E.A. Near-moving flower structures of the south-west of the Orenburg region. Regional Geology and Metallogeny, 2020. Vol. 82. pp. 60-68. (In Russ.)
5. Dragunov A.A., Mukhamadiev R.S., Chernov S.V. The influence of geodynamic processes on the filtration-capacitance properties of the geological environment (on the example of the Romashkinskoye field). Geo-resources, 2017. No. 4. pp. 319-322. (In Russ.)
6. Etirmishli G.J., Valiev G. O., Kazimova S. E., Ismailova S. S., Kazimov I. E. Technologies of residual oil extraction. Geology and Geophysics of the South of Russia. 2019. Vol. 9 (1). pp. 84-96. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26790 (In Russ.)
7. Ivanova N.A., Safonov A.O. Features of the structure of the halogen strata of the junction zone of the Caspian depression and the Volga-Ural anticline on the territory of the Orenburg region. The subsoil of the Volga region and the Caspian Sea, 2010. Vol. 61. pp. 33-41. (In Russ.)
8. Lukyanov V.F. Radial-concentric structures in the eastern part of the Voronezh Crystal massif (VCM). Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geology, 2000. Issue 9. pp. 31-37. (In Russ.)
9. Muravyev V.V. Geodynamics and oil and gas potential of systems of concentric dislocations of the lithosphere. In the book: "Conditions of formation and patterns of placement of oil and gas deposits". Kiev. Naukova Dumka, 1983. pp. 121-127. (In Russ.)
10. Muslimov R. H., Plotnikova I. N. It is time to start modeling the processes of reproduction of hydrocarbon reserves in long-term exploited fields. Modeling of the geological structure and

development processes is the basis for the successful development of oil and gas fields: dokl. naMezhdunarod. Scientific and practical conference on September 4-5, 2018. Kazan, 2018. pp. 292-294. (In Russ.)

11. Samartsev S. K., Danilova, E. A., Dragunov A. A., Dragunov V. A. Geodynamically active centers of hydrocarbon generation as possible sources of replenishment of the Orenburg oil and gas condensate field. *Drilling and Oil*, 2021. No. 4. pp. 10-13. (In Russ.)

12. Smirnova M. N. Oil and gas ring structures and scientific and methodological aspects of their study. *Geology of Oil and gas*, 1997. No. 9. pp. 1-6. (In Russ.)

13. Sokolov A. G. Identification and tracking of tectonic disturbances based on seismic survey data and forecasting of fault traps in the platform Orenburg region: monograph. Orenburg. OSU, 2010. 205 p. (In Russ.)

14. Kharchenko V. M. The nature of the structures of the central type and the regularities of the distribution of hydrocarbon deposits, local and regional earthquake foci. *Bulletin of the North Caucasus Technical University*, 2006. No. 2 (6). pp. 48-53. (In Russ.)

15. McKirdy D. M. Hydrocarbon generation and migration. In book: *The Petroleum Geology of South Australia, Vol. 2: Eromanga Basin*. Edition: 2<sup>nd</sup>. Chapter: 10. Publisher: South Australia. Department of Primary Industries and Resources. Editors: T. B. Cotton, M. F. Scardigno, J. E. Hibbert. 2006.

16. Davison I., Barreto P. Exhumed portuguese oil field suggests conjugate potential. *GEOExPro*, 2019. pp. 38-40.

17. Grillot J. C. Tectonics of Late and Post-hercynian Ages in the Western of the Iberian Plate (Portugal). *Comptesrendus de l'académie des sciences*, 1984. Vol. 299. pp. 665-670.

18. Mann P., Gahagan L., and Gordon M. B. Tectonic setting the world's giant oil and gas fields, in M. T. Halbouty, ed., *Giant oil and gas fields of the Decade 1990-1999*. *Memoirs of AAPG*, 2003. Vol. 78. pp. 15-105.

19. Naumann S., Sakariassen R. Diving deeper to reveal hydrocarbon potential in the Barents sea. *GEOExPro*, 2019. pp. 20-24.

20. Saadallah A. A proposed new tectonic model for the Northen Algerian Alpine Region based on studies of the Internal Zone rejects the previous model and suggests ideas for new hydrocarbon traps and prospects. *GEOExPro*, 2019. pp. 14-18.

## ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 550; 550.34; 556.

DOI: [10.46698/VNC.2021.18.33.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.18.33.004)

Оригинальная статья

## Инженерно-геологические условия северо-западной территории г. Махачкалы в связи с подтоплением

В. М. Кондаков , С. А. Мамаев , М. А. Мусаев , А. С. Мамаев ФГБУН Институт геологии Дагестанского научного центра РАН, Россия, 367010,  
Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Ярагского, 75, e-mail: dangeogis@mail.ru

Статья поступила: 15.07.2021, доработана: 18.08.2021, принята к публикации: 26.08.2021

**Резюме: Актуальность работы.** Определение геоморфологических и геологических условий северо-западной площади г. Махачкалы, включая Новолакский район (Новострой), в связи с процессами засоления, осолонцевания и подтопления сельскохозяйственных земель. В настоящее время город интенсивно расширяется во все стороны. Особенно актуально изучение северо-западной территории г. Махачкалы в связи с подтоплением. Район относится к Прикаспийской низменности с отрицательными отметками рельефа. Отсутствие исследований по указанным проблемам может привести к нежелательным материальным и экологическим последствиям. В связи с подтоплением изменяются и несущие способности грунтов. Изменяются сейсмоакустические свойства грунтов, т. е. скорости распространения продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) волн, а также соответствующие коэффициенты и декременты их поглощения. **Цель работы.** Определить границы слабо дренированных и весьма слабо дренированных зон, которые выявляют барражные участки территории, и гидрогеологические районы в зависимости от водопроницаемости составных верхней и нижней толщ грунтов. **Методы исследований.** Сбор базы данных инженерно-геологических изысканий по химическому составу грунтовых вод и литологии покровных толщ грунтов. Сбор гидрогеологических параметров разных типов грунтов и гранулометрического состава песков с целью интерпретации их фильтрационных свойств. Определение уклона рельефа местности с целью выявления зон дренированности территории. **Результаты работы.** Представлены таблицы химического состава грунтовых вод по 19-ти объектам и гидрогеологических условий площади по данным инженерно-геологических изысканий по 39-ти объектам, в том числе глубины залегания грунтовых вод, типа грунтов по сейсмичности, глубины залегания коренных пород, трех таксонов гидрогеологических районов, уклонов рельефа. Для выделенных гидрогеологических районов: для ГР-1 рекомендуется горизонтальный тип дренажа, для ГР-2 – вертикальный или комбинированный типы дренажа, для ГР-3 – подземный дренаж не эффективен. Указано о необходимости сейсмического микрорайонирования не только исследованного района, но и всего города Махачкалы, с перспективой дальнейшей застройки.

**Ключевые слова:** подтопление, дренирование, барражные участки, гидрогеологическое районирование, грунтовые воды, сейсмичность.

**Для цитирования:** Кондаков В. М., Мамаев С. А., Мусаев М. А., Мамаев А. С. Инженерно-геологические условия северо-западной территории г. Махачкалы в связи с подтоплением. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (3): 45 – 54. DOI: 10.46698/VNC.2021.18.33.004.

DOI: [10.46698/VNC.2021.18.33.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.18.33.004)

Original paper

## Engineering and geological conditions of the north-western territory of Makhachkala due to flooding

V. M. Kondakov , S. A. Mamaev , M. A. Musaev , A. S. Mamaev 

Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the RAS, 75Yaragskiy Str., Makhachkala 367010, Russian Federation, e-mail: dangeogis@mail.ru

Received: 15.07.2021, revised: 18.08.2021, accepted: 26.08.2021

**Abstract: Relevance.** Determination of the geomorphological and geological conditions of the north-western area of Makhachkala, including the Novolaksky district (Novostroy), in connection with the processes of salinization, alkalization and flooding of agricultural lands. Currently, the city is intensively expanding in all directions. Particularly interesting is the study area of the northwestern territory of Makhachkala due to flooding. It belongs to the Caspian lowland with negative relief marks. Lack of research on these problems can lead to undesirable material and environmental consequences. Due to flooding, the bearing capacity of the soil also changes. The seismoacoustic properties of soils change, i. e. the velocities of propagation of longitudinal ( $V_p$ ) and transverse ( $V_s$ ) waves, as well as the corresponding coefficients and decrements of their absorption. **Aim.** Determine the boundaries of poorly drained and very poorly drained zones, which reveal barrage areas of the territory, and hydrogeological areas, depending on the water permeability of the composite upper and lower soil strata. **Methods.** Collecting a database of geotechnical surveys on the chemical composition of groundwater and lithology of cover layers of soils. Collecting hydrogeological parameters of different types of soils and granulometric composition of sands in order to interpret their filtration properties. Determination of the slope of the terrain in order to identify the drainage zones of the territory. **Results.** Presented are tables of the chemical composition of groundwater for 19 objects and hydrogeological conditions of the area according to engineering and geological surveys for 39 objects, including the depth of groundwater, the type of soil in terms of seismicity, the depth of bedrock, three taxa of hydrogeological regions, slopes of the relief. For the selected hydrogeological regions: GR-1 – a horizontal type of drainage is recommended, for GR-2 – vertical or combined types of drainage, for GR-3 – underground drainage is not effective. It is indicated that it is necessary to seismic microzoning not only of the investigated area, but of the entire city of Makhachkala with the prospect of further development.

**Keywords:** flooding, drainage, barrage areas, hydrogeological zoning, aquifers, seismicity.

**For citation:** Kondakov V.M., Mamaev S.A., Musaev M.A., Mamaev A.S. Engineering and geological conditions of the north-western territory of Makhachkala due to flooding. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (3): 45 – 54. DOI: 10.46698/VNC.2021.18.33.004.

### Введение

В связи с подтоплением г. Махачкалы ранее были рассмотрены центральная и юго-восточная части города [Кондаков, Кондакова, 2019; Кондаков и др., 2020]. В настоящей статье продолжается анализ северо-западной площади г. Махачкалы. Условиями развития подтопления (СП 11-105-97, 1997; Отчет о СМР г. Махачкалы, 1988) являются: подпор грунтовых вод (ГВ) на побережьях рек, озер, водохранилищ, моря, орошение сельскохозяйственных культур.

Природные условия. В тектоническом отношении район работ относится к южному крылу Восточно-Предкавказского краевого прогиба, осложненному Нарат-

Тюбинской зоной разрывов [Хаин, Ломизе, 1995; Мамаев и др., 2020]. Направление простирания оси прогиба близко к широтному с погружением оси от сел. Степное до сел. Бабаюрт.

Относительно более пластичные третичные отложения надвинуты в этой зоне на коренные отложения. От линии Буйнакский перевал – пост ГИБДД в северном направлении коренные отложения резко понижаются на север до углов падения 20-45 градусов. Это хорошо видно на местности «Черные камни», где кончается южная граница территории нефтебазы. Нарат-Тюбинский хребет сверху сложен чокракскими отложениями. На территории города в чокракских песчаниках в 1942-1944 гг. было открыто месторождение нефти [Брод, 1938; Милановский, Хаин, 1963; Островский и др., 1994; Imaeva et al., 2017; Vornuyakov et al., 2017]. Далее на север развиты мощные толщи четвертичных (до 1500 м) и подстилающих коренных сарматских, конк-караганских, чокракских песчано-глинистых отложений.

Инженерно-геологические условия г. Махачкалы приводились ранее в [Ревелис, Кучеренко, 1969; Отчет о СМР..., 1988]. Низменная часть г. Махачкалы представлена двумя террасами: Махачкалинской (– 2 м) и низкой – Дагестанской (– 16 м). Общая мощность отложений достигает 5-7 м на Дагестанской террасе и 10-12 м – на Махачкалинской террасе.

Северо-западнее ж/д станции Махачкала-1 когда-то выделялись дюнные образования, перекрывавшие на значительной площади верхнехвалынские и новокаспийские террасы. В настоящее время территория застроена. Новокаспийская терраса протягивается вдоль моря узкой полосой, от 500 м до нескольких километров. В дельтах рек, в том числе реки Сулак, ширина террасы достигает нескольких километров. Грунтовые воды на новокаспийской террасе формируются за счет инфильтрации атмосферных осадков; воды пресные и солоноватые.

Ручей Тернаир берет начало на северо-восточных склонах Нарат-Тюбинского хребта, пересекает проспект Акушинского (пр. Акушинского, р. Тернаир, жилой квартал) и на низменность поступает по глубоко врезанной, балке, расположенной, западнее г. Тарки-Тау. Борта балки обрывистые, высота их колеблется от 1 до 8 метров. При подходе к Дагестанской террасе ручей резко поворачивает на восток и впадает в Каспийское море в районе ж/д станции Махачкала-1. Ранее на низменности он не имел ясно выраженного русла. Сейчас русло зарегулировано ввиду застройки территории. Наибольшее количество воды ручей несет в период таяния снегов и обильно выпадающих осадков. В низменной части, на площади дагестанской террасы ручей часто затапливает смежные площади, к примеру, на улице Кундухова – жилые дома и пристройки.

Ручей нуждается в искусственном регулировании русла, своевременной очистке от грязи и мусора. Северо-западная площадь города не связана с областью питания от горы Тарки-Тау. Здесь речка Тернаир-Балка отсекает область питания со стороны плато Тарки-Тау.

## Методы исследований

В процессе работы были собраны данные инженерно-геологических изысканий по химическому составу грунтовых вод и литологии покровных толщ грунтов. Также были собраны данные гидрогеологических параметров разных типов грунтов и гранулометрического состава песков с целью определения по интерпретации их фильтрационных свойств. Были определены уклоны рельефа местности с целью выявления зон дренированности территории.

**Гидрогеологическое районирование территории г. Махачкалы.** При районировании территории были использованы принципы таксономических единиц, предложенные ранее в работах [Кац и др., 1981; Корулов, 2013; Корулов et al., 2015].



Коэффициенты фильтрации были взяты по аналогии с гранулометрическим составом [Кондаков и др., 2020; Монюшко, 1974, 1985]. В результате гидрогеологического районирования были выделены зоны дренированности (рис. 1) и гидрогеологические районы. Зоны дренированности (З-Д) были выделены по уклону рельефа: более или равно 0,01 – З-Д, 0,01-0,005 – З-СД, <0,005 – З-ВСД.

### Результаты работ и их обсуждения

Пологие площади бывшего леса Эльтав, пос. Семендер, Научного городка, бывшего летного поля являются областью питания грунтовых вод. Это подтверждается пресным составом подземных вод. Перечисленные площади характеризуются как зоны дренированные (уклон рельефа >0,01) и слабо дренированные (З-Д, З-СД).

Транзитная область движения грунтовых вод характеризуется зонами дренированной (З-Д) и слабо дренированной (З-СД), где уклон рельефа меняется от 0,02 до 0,005. Область разгрузки грунтовых вод выражена весьма слабодренированной зоной (З-ВСД) с уклоном рельефа <0,005.

Площади разгрузки грунтовых вод в естественных условиях выражены солончаками и солонцами с характерным белесым видом. Ввиду выпаривания грунтовых вод их минерализация достигает 53 г/литр (Новокули, Новострой).



Рис. 1. Зоны дренированности Северо-западной площади г. Махачкалы.

Условные обозначения:

З-Д – > 0,01 – зона дренированная. З-СД – 0,01-0,005 – зона слабодренированная. З-ВСД – < 0,005 – зона весьма слабодренированная. 📍 – точки определения высот местности /

Fig. 1. Drainage zones of the North-West area of Makhachkala.

Legend:

З-Д – > 0.01 – drainage zone (Z-D). З-СД – 0.01-0.005 – poorly drained zone (Z-SD). З-ВСД – <0.005 – the zone is very poorly drained (W-VSD). 📍 – terra in elevation points

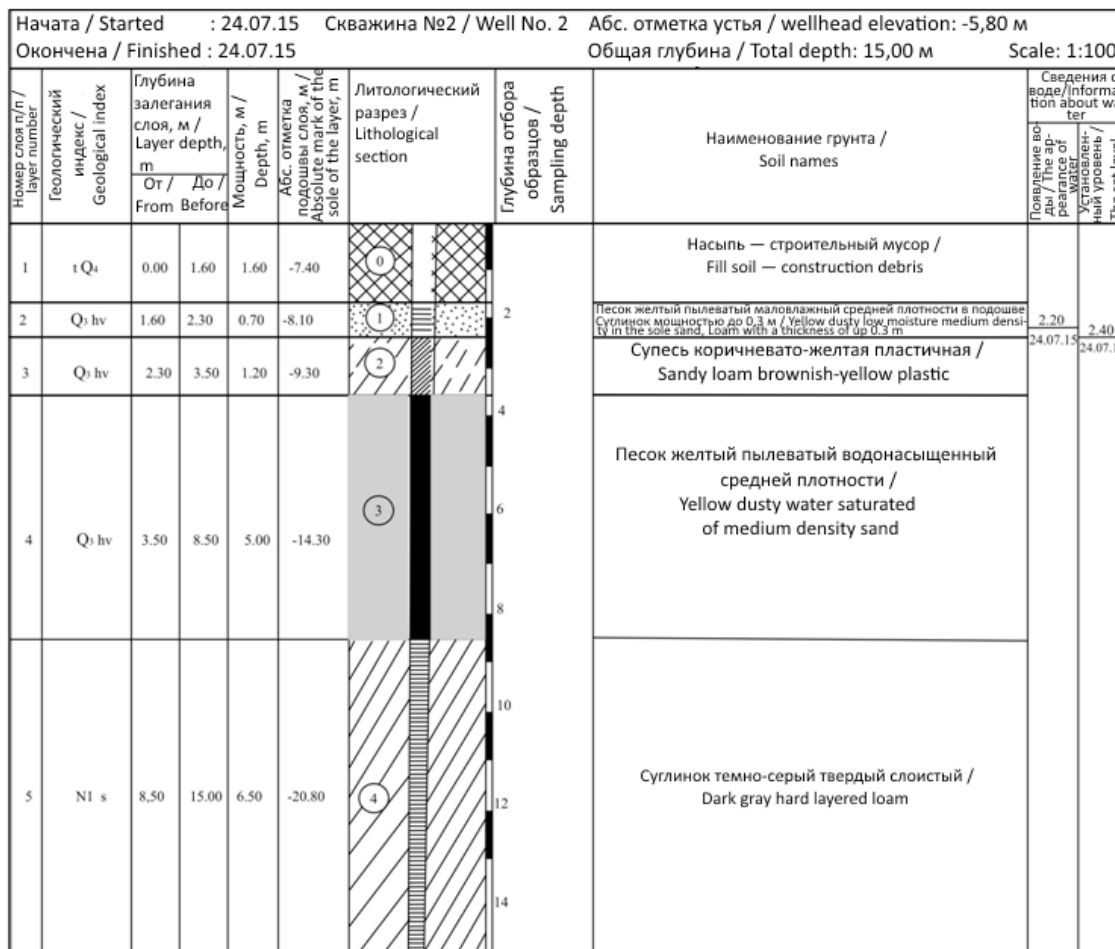


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез под строительство многоэтажного дома по ул. Керимова, у администрации Кировского района. Сверху и снизу водопроводимые водоносные толщи (с КВ –10 и 5 м<sup>2</sup>/сут.); гидрогеологический район 1. Зона дренируемая – З-Д. /

Fig. 2. Engineering-geological section for the construction of a multi-storey building on the street. Kerimov, at the administration of the Kirovsky district. Above and below water-conducting aquifers (with CV –10 and 5 m<sup>2</sup>/day); hydrogeological area 1. Drainagezone – Z-D.

Граница между зонами дренирования З-ВСД и З-СД проходит по северной окраине (Новые участки) сел. Шамхал (точка 7), далее по сел. Шамхал (восточная окраина с пересечением железной дороги, т. 5); потом по юго-восточной части сел. Шамхал-Термен (т. 6); затем следует по южной окраине сел Красноармейское (т. 11); далее по северной границе бывшего лётного поля, по северной окраине леса Эльтав (между точками 2 и 4).

Гидрогеологические районы (см. табл. 2) были выделены по соотношению коэффициентов водопроницаемости верхней и нижней покровных толщ, включительно до глубины залегания регионального водоупора.

Гидрогеологический район 2 (ГР-2) представляет собой случай залегания также 2-х водоносных толщ. Сверху залегает слабопроницаемая толща мощностью от 5 до 10 м, ниже залегает хорошо проницаемая толща с КВ от 4 до 60 м<sup>2</sup>/сут. Инженерно-геологические разрезы, характерные для гидрогеологического района 2 это площади многоэтажного дома по улице Кундухова 5, многоэтажных домов по ул. Аэропортовское шоссе (р-он Новый Город).

Гидрогеологический район 3 (ГР-3) представлен слабопроницаемыми одно- или двухслойной толщами, с КВ менее 4 м<sup>2</sup>/сут. Глубина залегания регионально-

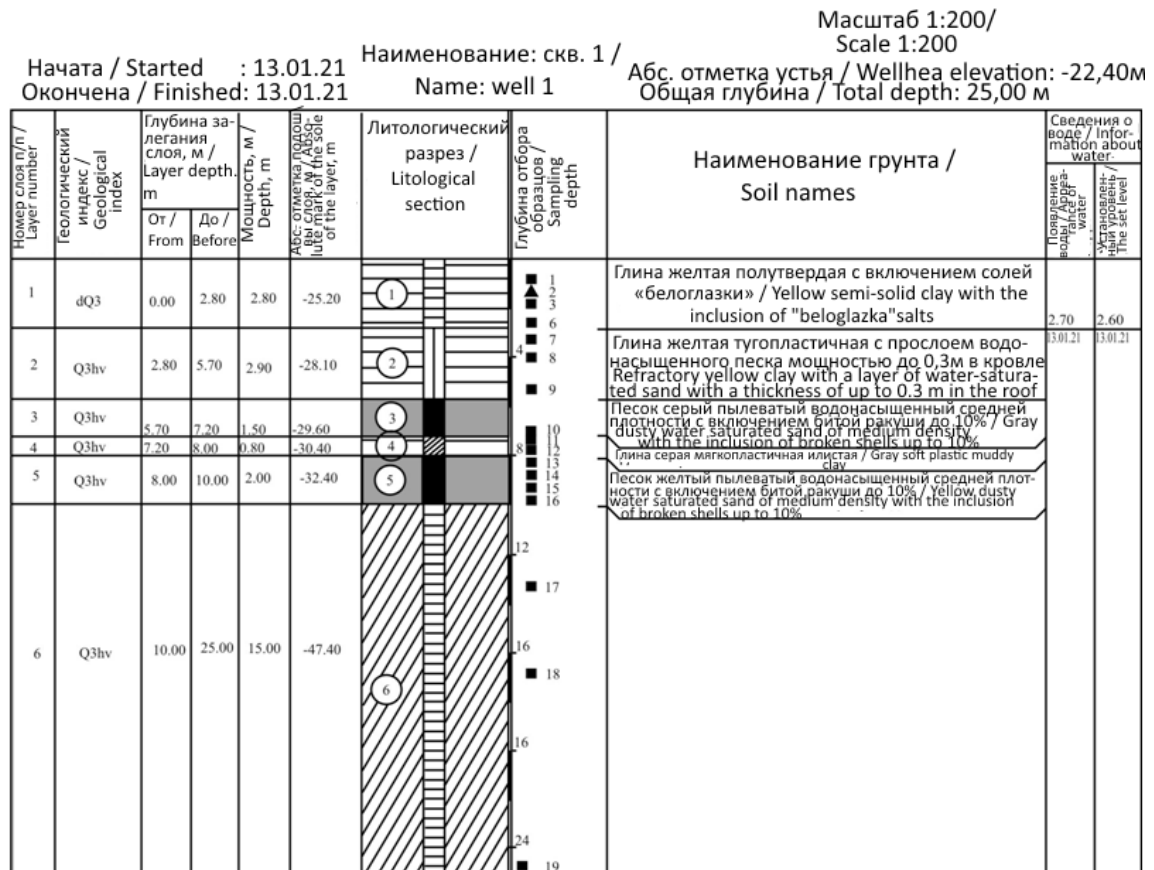


Рис. 3. Инженерно-геологический разрез под строительство «Медицинский центр в сел. Новолакское». Сверху и снизу слабо водопродимые водоносные толщи (с КВ 3 и 4 м<sup>2</sup>/сут.); гидрогеологический район 3. Зона весьма слабодренированная – 3-ВСД /

Fig. 3. Engineering-geological section for the construction of "Medical center in the village. Novolakskoe". Above and below, poorly water-conducting aquifers (with CV 3 and 4 m<sup>2</sup>/day); hydrogeological area 3. Very weak drained zone – W-ESD.

го водоупора меняется в пределах 5-20 м, более часто до 14 м. Примерами служат следующие объекты: (рис. 3) Медицинский центр в сел. Новолакское; 9-ти этажный жилой дом в сел. Новокули (Новострой), Фавзун-Городок (пос. Семендер). Перечисленные площади ГР-3 (объекты) в сочетании с весьма слабой зоной дренированности (3-ВСД) являются бражными участками, препятствующими потокам грунтовых вод, их оттоку.

**Влияние обводненности грунтов на их сейсмические свойства.** В связи с подтоплением изменяется и несущая способность грунтов. Особенно такое явление наблюдается в городах и населенных пунктах, где имеет место затопление подземных коммуникаций и технических подвалов [Cooper et al., 1965; Заалишвили, 2009; Shi et al., 2015; Zhang et al., 2018]. Конечно же, следует учитывать и атмосферные осадки, и резкое уменьшение испарения влаги из-за асфальтовых покрытий. Сейсмические свойства грунтов, где распространены просадочные грунты в основаниях зданий, могут изменяться в процессе строительства и эксплуатации под воздействием техногенных явлений. Еще одна важная особенность состоит в том, что водопродимые толщи грунтов и участки разгрузки грунтовых вод представляют опасность образования просадки под фундаментами.

По материалам инженерно-геологических изысканий и полученным геофизическим данным можно определить приращение сейсмической интенсивности ис-

следуемого участка к среднему (исходному) баллу. Расчет приращения производится в соответствии с эмпирической формулой С. В. Медведева [Медведев, 1962]:

$$\Delta J = 1,671g \frac{\bar{V}_0 \bar{\rho}_0}{\bar{V}_i \cdot \bar{\rho}_i} + e^{-0,04Z_h^2} + \Delta J_{рез},$$

где  $\bar{V}_0 \bar{\rho}_0$  и  $\bar{V}_i \bar{\rho}_i$  – сейсмические жесткости, соответственно средних и исследуемых грунтов,  $Z_h$  – глубина уровня грунтовых вод (УГВ),  $\Delta J_{рез}$  – приращение за счет резонанса грунтов.

Уровень стояния грунтовых вод (УГВ) связан с сейсмическими свойствами грунтов. Известно, что влияние грунтовых вод при их уровне ниже 10 м не существенно. Сейсмическое событие сопровождается спектральным составом, формирующимся в процессе прохождения сейсмической волны по разным грунтовым толщам. Основную форму колебаний представим в соответствии с эмпирической формулой [Kanai, 1952]:

$$T=4H/v_s,$$

где  $T$  – период колебаний;  $H$  – мощность толщи;  $v_s$  – скорость распространения поперечной волны.

Анализ инженерно-геологических условий территории города (Сейсмическое микрорайонирование..., 1988), а также значений скоростей распространения сейсмических волн в грунтах показывает, что ни один тип грунта или инженерно-геологический участок не отвечает в полной мере понятиям среднего или эталонного грунта. Наилучшими грунтами с сейсмической точки зрения на территории г. Махачкалы являются трещиноватые известняки среди толщи сарматских глин, расположенные в пределах Анжарской гряды. Скорости распространения сейсмических волн в 10 метровой толще на участках выходов этих известняков, исключая верхние 2 м, составляют:  $V_p = 1860$  м/с,  $V_s = 680$  м/с (плотность  $\rho = 2,1$  г/см<sup>3</sup>).

Эти значения несколько ниже приводимых в п. 5.3. РСН 66-87, но если приведенные параметры сопоставить с минимальными значениями параметров «средних» грунтов (п. 5.1 РСН 66-87), то окажется, что разница по продольным волнам составляет – 1,0 балла, а по поперечным волнам – 0,88 балла. Средняя разница между предложенными параметрами грунтов и минимальными параметрами «средних» грунтов по п. 5.1. РСН 66-87 составляет – 1 балл. Исходная сейсмическая интенсивность на выходах этих грунтов должна быть уменьшена на 1 балл по сравнению с фоновой интенсивностью, равной 8 баллам для средних грунтов.

В связи с изложенным выше, необходимо провести работы по созданию цифрового комплекса (цифровая платформа), с использованием геоинформационных технологий и специализированного дистанционного зондирования (далее СДЗ), в рамках разработки единой государственной геоинформационной системы «Цифровая геологическая карта» Республики Дагестан (ГИС ЦГК РД), в части выявления опасности, обработки и мониторинга сейсмической обстановки. Для этого необходимо использовать результаты работ по сеймотектоническому исследованию и по сейсмическому микрорайонированию территории г. Махачкалы. Подобный опыт работ имеется в Институте геологии ДФИЦ РАН [Мамаев и др., 2018 и др.].

## Выводы

1. Северо-западная площадь г. Махачкалы естественно-природноподтопленная. Верхняя махачкалинская терраса менее подтоплена.
2. Процесс подтопления, с учетом застройки города, будет усиливаться.
3. Для уменьшения процесса подтопления необходимо сократить строительство многоэтажных жилых домов на площадях зон весьма слабодренированных.

4. Весьма слабодренированные территории в сочетании с аридным климатом и верхней слабопроницаемой покровной толщей выражены солончаками и солонцами.

5. Для выделенных ГР-1 рекомендуется горизонтальный тип дренажа, для ГР-2 – вертикальный или комбинированный типы дренажа, для ГР-3 – подземный дренаж не эффективен.

6. Город интенсивно расширяется вследствие строительства многоэтажных и малоэтажных домов. Анализ проведенных исследований показывает необходимость проведения сейсмического микрорайонирования города Махачкалы в современных границах и на перспективу.

### Литература

1. Брод И. О. Тектоника и нефтеносность Восточного Предкавказья. // Советская геология. – 1938. – Т. VIII. № 7. – С. 3-23.
2. Заалишвили В. Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов населенных пунктов и больших строительных площадок. – М.: Наука, 2009. – 350 с.
3. Кац Д. М., Шестаков В. М. Мелиоративная гидрогеология. – М.: Недра, 1981. – 296 с.
4. Кондаков В. М., Кондакова Н. В. Интерпретация фильтрационных свойств водоносных песков. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2019. – № 2 (77). – С. 50-54.
5. Кондаков В. М., Мамаев С. А., Мусаев М. А. Геоморфологические и гидрогеологические условия северо-западной площади г. Махачкалы в связи с подтоплением. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2020. – № 4 (83). – С. 28-40. DOI: 10.33580/2541-9684-2020-83-4-28-40
6. Мамаев С. А., Ибаев Ж. Г., Гусейнова А. Ш., Курбанисмаилова А. С., Мамаев А. С. Геоинформационные базы данных гидрогеологических параметров артезианских скважин Терско-Кумского артезианского бассейна. // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – № 3. – С. 51-63. DOI 10.23671/VNC.2018.3.16545
7. Мамаев С. А., Юсупов А. Р., Мамаев А. С., Юсупов З. А. Сейсмоструктура высокогорной части Восточного Кавказа и перспективы газоносности на примере естественного проявления газа с. Цушар (Дагестан). // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 4. – С. 150-163. DOI: 10.46698/VNC.2020.88.37.009
8. Медведев С. В. Инженерная сейсмология. – М.: Госстройиздат, 1962. – 260 с.
9. Милановский Е. Е., Хаин В. Е. Геологическое строение Кавказа. – М.: Изд-во МГУ, 1963. – 240 с.
10. Монюшко А. М. Инженерно-геологическая оценка сарматских глин. – М.: Наука, 1974. – 35 с.
11. Монюшко А. М. Роль техногенеза в формировании инженерно-геологических свойств глин. – М.: Недра, 1985. – 143 с.
12. Островский В. Н., Островский Л. А., Шахнова Р. К. Региональные гидрогеологические классификации и картографирование. // В сб. научн. тр.: Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и экогеологии. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1994. – С. 5-12.
13. Ревелис И. Л., Кучеренко И. В. Инженерно-геологический очерк территории города Махачкалы. – Махачкала: Дагестанское книжное издательство, 1969. – 88 с.
14. Хаин В. Е., Ломизе М. Г. Геотектоника с основами геодинамики. Учебник. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 480 с.
15. Borneyakov S. A., Ma J., Miroshnichenko A. I., Guo Y., Salko D. V., Zuev F. L. Diagnostics of meta-unstable state of seismically active fault. // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2017. – Vol. 8 (4). – pp. 989-998.
16. Cooper H. H., Bredehoeft J. D., Papadopoulos I. S., Bennet R. R. The response of well-aquifer system to seismic waves. // *J. Geophysical Research*. – 1965. – Vol. 70. – pp. 3915-3926.

17. Imaeva L.P., Gusev G.S., Imaev V.S., Ashurkov S.V., Melnikova V.I., Seredkina A.I. Geodynamic activity of modern structures and tectonic stress fields in northeast Asia. // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2017. – Vol. 8 (4). – pp. 737-768.

18. Kanai K. Relation between the nature of surface layer and the amplitudes of earthquake motions. // *Bull. Earth. Res. Inst.* – 1952. – Vol. 30. – pp. 31-37.

19. Kopylov I. S. Geodynamic and technogenic processes in the areas of oil and gas production and their ecological consequences. // International Scientific Conference «Control of production and natural resources», Australia (Sydney), March 26 – April 6, 2013. *European Journal of Natural History*. – 2013. – No. 3. – p. 59. URL: [www.world-science.ru/euro/495-33138](http://www.world-science.ru/euro/495-33138).

20. Kopylov I. S., Kovin O. N., Konoplev A. V. Forecasting of geodynamic hazards at potash mines using remote sensing data: a case study of the Tubegatan deposit, Uzbekistan. // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. – 2015. – No. 1-3. – pp. 305-311.

21. Shi Zh., Wang G., Manga M., Wang C.-Y. Mechanism of coseismic water level change following four great earthquakes – insights from co-seismic responses throughout the Chinesemainland. // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2015. – Vol. 430. – pp. 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.08.012>

22. Zhang Sh., Shi Zh., Wang G., Zhang Zh. Quantitative Assessment of the Mechanisms of Earthquake-Induced Groundwater-Level Change in the MP Well, Three Gorges Area. // *Pure Appl. Geophys.* – 2018.

## References

1. Brod I. O. Tectonics and oil-bearing capacity of the Eastern Ciscaucasia. *Soviet Geology*, 1938. Vol. VIII. No. 7. pp. 3-23. (In Russ.)

2. Zaalishvili V.B. Seismic microzonation of urban territories, settlements and large construction sites. Moscow. Nauka, 2009. 350 p. (In Russ.)

3. Kats D. M., Shestakov V. M. Meliorative hydrogeology. Moscow. Nedra, 1981. 296 p. (In Russ.)

4. Kondakov V.M., Kondakova N. V. Interpretation of the filtration properties of aquifers. In: Proceedings of the Institute of Geology of DSC RAS, 2019. No. 2 (77). pp. 50-54. (In Russ.)

5. Kondakov V.M., Mamaev S. A., Musaev M. A. Geomorphological and hydrogeological conditions of the north-western area of Makhachkala due to flooding. In: Proceedings of the Institute of Geology of DSC RAS, 2020. No. 4 (83). pp. 28-40. DOI: 10.33580/2541-9684-2020-83-4-28-40. (In Russ.)

6. Mamaev S.A., Ibaev Zh.G., Guseinova A.Sh., Kurbanismailova A.S., Mamaev A. S. Geoinformational databases of the data of hydrogeological parameters of artesian wells of the Terry-Kum artesian basin. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2018. No. 3. pp. 51-63. DOI 10.23671/VNC.2018.3.16545 (In Russ.)

7. Mamaev S.A., Yusupov A.R., Mamaev A. S., Yusupov Z.A. Seismotectonics of the high mountain part of the Eastern Caucasus and the prospects of gas content on the example of the natural manifestation of gas in Tsuschar village (Dagestan). *Geology and Geophysics of Russian South*, 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 150-163. DOI: 10.46698/VNC.2020.88.37.009. (In Russ.)

8. Medvedev S. V. Engineering seismology. Moscow. Gosstroyizdat, 1962. 260 p. (In Russ.)

9. Milanovskii E. E., Khain V. E. Geological structure of the Caucasus. Moscow. MSU, 1963. 240 p. (In Russ.)

10. Monyushko A. M. Engineering-geological assessment of the Sarmatian clays. Moscow. Nauka, 1974. 35 p. (In Russ.)

11. Monyushko A. M. The role of technogenesis in the formation of engineering-geological properties of clay. Moscow. Nedra, 1985. 143 p. (In Russ.)

12. Ostrovskii V.N., Ostrovskii L.A., Shakhnova R.K. Regional hydrogeological classifications and mapping. In: Proceedings Modern problems of hydrogeology, engineering geology and ecogeology. Moscow. VSEGINGEO, 1994. pp. 5-12. (In Russ.)

13. Revelis I.L., Kucherenko I.V. Engineering-geological review of the territory of the city of Makhachkala. Makhachkala. Dagestan Book Publisher, 1969. 88 p. (In Russ.)
14. Khain V.E., Lomize M.G. Geotectonics with the basics of geodynamics. Textbook. Moscow. MSU, 1995. 480 p. (In Russ.)
15. Bornyakov S.A., Ma J., Miroshnichenko A.I., Guo Y., Salko D.V., Zuev F.L. Diagnostics of meta-instable state of seismically active fault. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2017. Vol. 8 (4). pp. 989-998.
16. Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopoulos I.S., Bennet R.R. The response of well-aquifer system to seismic waves. *J. Geophysical Research*, 1965. Vol. 70. pp. 3915-3926.
17. Imaeva L.P., Gusev G.S., Imaev V.S., Ashurkov S.V., Melnikova V.I., Seredkina A.I. Geodynamic activity of modern structures and tectonic stress fields in northeast Asia. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2017. Vol. 8 (4). pp. 737-768.
18. Kanai K. Relation between the nature of surface layer and the amplitudes of earthquake motions. *Bull. Earth. Res. Inst.*, 1952. Vol. 30. pp. 31-37.
19. Kopylov I.S. Geodynamic and technogenic processes in the areas of oil and gas production and their ecological consequences. In: International Scientific Conference "Control of production and natural resources", Australia (Sydney), March 26 – April 6, 2013. *European Journal of Natural History*, 2013. No. 3. p. 59. URL: [www.world-science.ru/euro/495-33138](http://www.world-science.ru/euro/495-33138).
20. Kopylov I.S., Kovin O.N., Konoplev A.V. Forecasting of geodynamic hazards at potash mines using remote sensing data: a case study of the Tubegatan deposit, Uzbekistan. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, 2015. No. 1-3. pp. 305-311.
21. Shi Zh., Wang G., Manga M., Wang C.-Y. Mechanism of coseismic water level change following four great earthquakes – insights from co-seismic responses throughout the Chinese mainland. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015. Vol. 430. pp. 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.08.012>
22. Zhang Sh., Shi Zh., Wang G., Zhang Zh. Quantitative Assessment of the Mechanisms of Earthquake-Induced Groundwater-Level Change in the MP Well, Three Gorges Area. *Pure Appl. Geophys.*, 2018.

УДК 550.34+550.341

DOI: [10.46698/VNC.2021.11.83.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.11.83.005)

Оригинальная статья

## О вероятности превышения воздействий в строительных нормах

Ф. Ф. Аптикаев 

ФБГУН Институт физики Земли РАН, Россия, 123242, Москва,  
ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, e-mail: felix@ifz.ru

Статья поступила: 02.07.2021, доработана: 02.08.2021, принята к публикации: 19.08.2021

**Резюме: Актуальность работы.** Во всем мире на картах сейсмической опасности приводятся наиболее вероятные значения сейсмических воздействий. В соответствии с допустимым риском эти значения могут быть увеличены. Например, в международных нормах для расчета сейсмостойкости радиационно-опасных объектов наиболее вероятные значения ускорений увеличиваются на величину стандартного отклонения. В отечественных строительных нормах предполагается использование наиболее вероятных значений. Считается, что вследствие различных факторов расчеты воздействий сопровождаются некоторыми погрешностями, вследствие чего оценки воздействий могут быть завышены на 10, 5 и 1% для карт ОСР А, В и С соответственно. Эти оценки были существенно увеличены при округлении оценок интенсивности до целочисленных значений баллов. Однако в пояснительной записке это не было отражено. Поэтому вместо 10, 5 и 1% для карт ОСР А, В и С следуют значения 50, 45 и 41% соответственно. Поскольку баллы нельзя непосредственно использовать в инженерных расчетах, согласно строительным нормам, производится пересчет баллов в ускорения по шкале MSK-64. Однако, еще создатели шкалы MSK-64 в карт ОСР и шкалы MSK-64 указывали, что шкала занижает оценки ускорений примерно в полтора раза. Причина – в шкале MSK-64 приводятся не реальные, а фильтрованные значения. Во время создания этой шкалы основная масса зданий имела не более 5 этажей. Фильтрацией удалялись низкочастотные составляющие, неопасные для существующих зданий. **Цель работы** – оценить реальную вероятность превышения уровня воздействий при расчетах сейсмостойкости зданий и сооружений. **Методы исследования** – анализ процедур оценки расчетных воздействий с использованием карт ОСР и строительных норм. **Результаты работы** – показано, что нормативный уровень ускорений при расчетах сейсмостойкости более, чем в два раза ниже реальных значений.

**Ключевые слова.** Строительные нормы, сейсмические воздействия, карты ОСР, шкала MSK-64, вероятность превышения уровня расчетных воздействий.

**Для цитирования:** Аптикаев Ф. Ф. О вероятности превышения воздействий в строительных нормах. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (3): 55 – 62. DOI: [10.46698/VNC.2021.11.83.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.11.83.005).



[DOI: 10.46698/VNC.2021.11.83.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.11.83.005)

Original paper

## An exceedance probability of the influence in the Building Code

F. F. Aptikaev 

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, 10/1  
Bolshaya Gruzinskaya, Moscow 123242, Russian Federation, e-mail: felix@ifz.ru

Received: 02.07.2021, revised: 02.08.2021, accepted: 19.08.2021

**Abstract: Relevance.** All over the world, the most probable values of seismic impacts are shown on seismic hazard maps. According to the acceptable risk, these values can be increased. In domestic building codes, it is customary to use the most likely values. It is believed that due to various factors, the impact calculations are accompanied by some errors, as a result of which the impact estimates may be overstated by 10, 5 and 1% for the general SRF maps A, B and C, respectively. However, these estimates were significantly increased when rounding the intensity estimates to integer values of the scores. However, this was not reflected in the explanatory note. Since the points cannot be directly used in engineering calculations, according to the building codes, the points are converted into accelerations on the MSK-64 scale. However, even the creators of the OSR maps and the MSK-64 scale indicated that the scale underestimates the acceleration estimates by about one and a half times. **The Aim of the work** is to assess the real probability of exceeding the impact level when calculating the seismic resistance of buildings and structures. **Research methods** – analysis of procedures for assessing calculated impacts using SRF maps and building codes. **Results of the work** – it is shown that the standard level of accelerations in the calculations of seismic resistance is more than twice lower than the real values.

**Keywords:** Building codes, seismic impacts, OSR maps, MSK-64 scale, probability of exceeding the level of calculated impacts.

**For citation:** Aptikaev F.F. An exceedance probability of the influence in the Building Code. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (3): 55 – 62. DOI: 10.46698/VNC.2021.11.83.005.

### Введение

На картах ОСР (рис. 1-2) приводятся наиболее вероятные оценки ожидаемой интенсивности в баллах. Обозначим эту величину символом  $h_n$ . Для расчета сейсмостойкости объектов уровень воздействий увеличивается в соответствии с допустимым риском. Например, для радиационно-опасных объектов в международных нормах, расчетный уровень воздействий повышается на величину стандартного отклонения. Считается, что картам ОСР-А, В, С соответствуют вероятности превышения воздействий в баллах в 10, 5 и 1% соответственно (что не совпадает с оценками по правилам статистики [Аптикаев, 2020]). Обозначим величину номинальных превышений символом  $h_1$ . Проектировщики часто воспринимают это положение так, что добавка этих процентов переведет воздействия в следующий балл. Но это не так. Превышения задаются относительно средних, наиболее вероятных значений. Например, если карте А соответствует интенсивность 7 баллов, то превышение составит 60%.

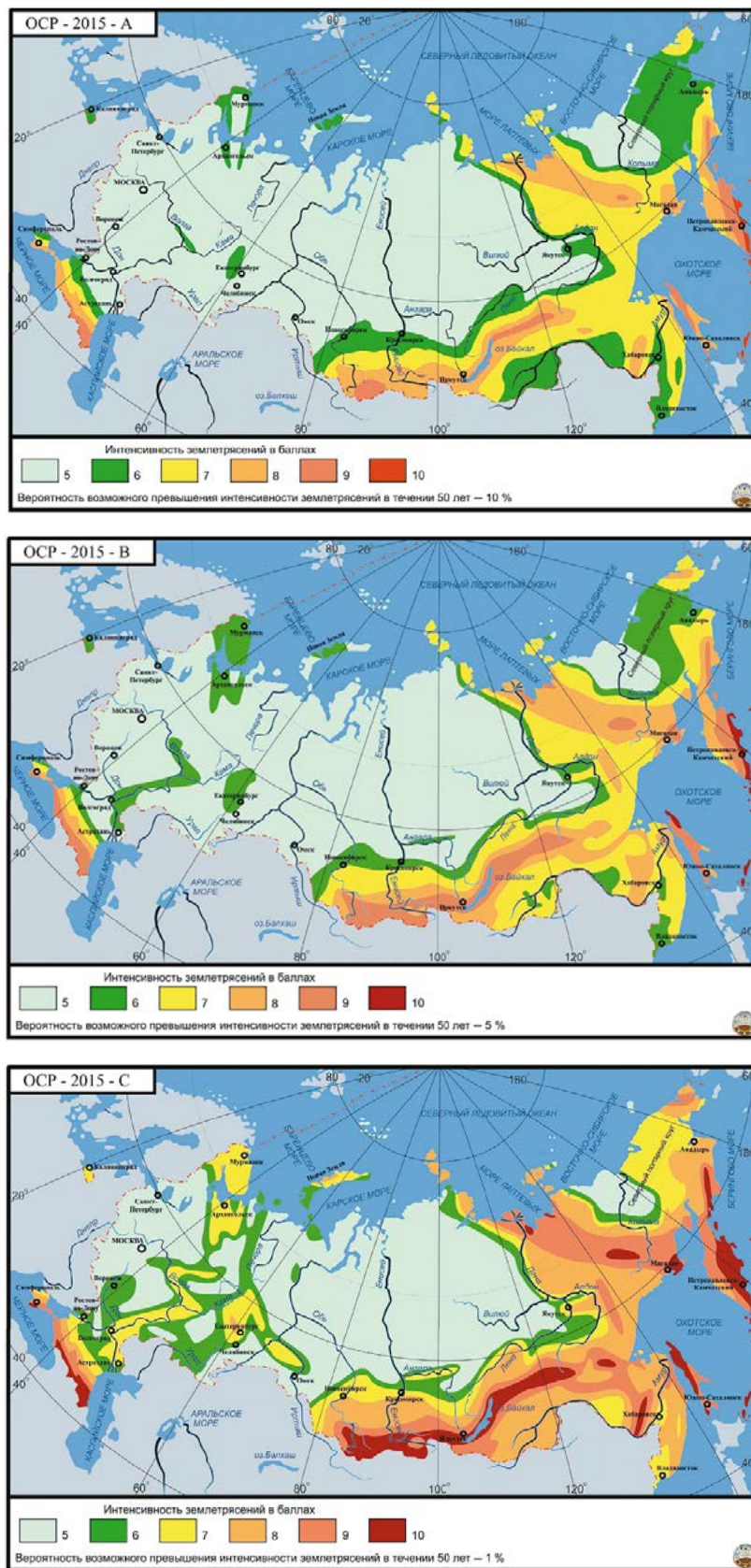


Рис. 1. Карты общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – OCP-2015 /

Fig. 1. General seismic zoning maps of the Russian Federation – GSZ-2015

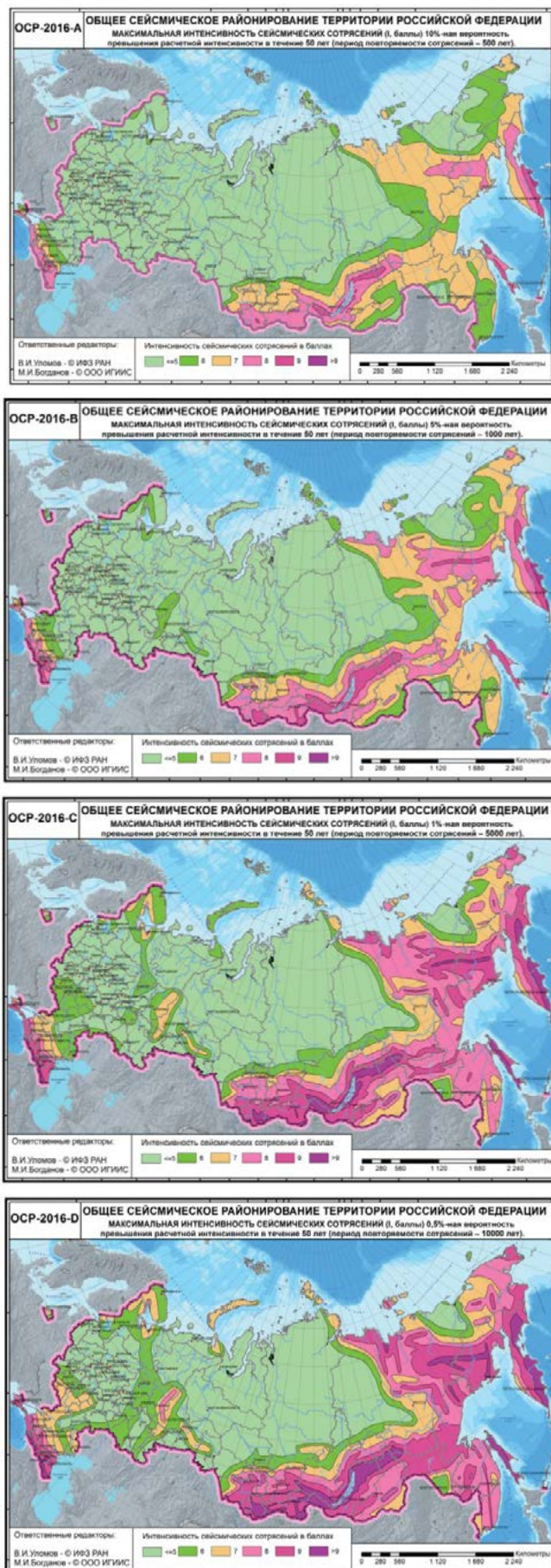


Рис. 2. Карты общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-2016 /

Fig. 2. General seismic zoning maps of the Russian Federation – GSZ-2016

## Методы исследования

**Анализ расчетов вероятностей и их оценки.** Расчеты вероятностей ведутся по формулам, предполагающим непрерывность переменных величин. Именно так и были получены упомянутые выше оценки 10, 5, 1%. При конечном формировании карт ОСР проведено округление оценок до целочисленных значений баллов. Следовательно, допускается превышение воздействий на 0,4 балла (половина балла увеличивается до целого). Тогда говорить о 10, 5 и 1% не приходится: 0,4 балла – это 40%. Обозначим эту величину символом  $h_1$ . Таким образом, для карты А, например, к наиболее вероятному значению превышения 50% добавляем расчетное превышение  $h_1 = 10\%$  и превышение, связанное с округлением  $h_2 = 40\%$  и в итоге получаем 100% вероятность превышения. Другими словами, карты ОСР занижают оценки воздействий на один балл.

## Результаты работы

Дальнейшее возрастание вероятности превышения уровня воздействий связано с пересчетом баллов в ускорения по шкале MSK-64, используемой в СП 14.13330.2018. В шкале MSK-64 приводятся фильтрованные значения ускорений (эффективных ускорений). С.В. Медведев [1978] и В.И. Уломов [1994] указывали, что фильтрованные амплитуды в MSK-64 примерно в 1,5 раза ниже реальных. Интенсивностям 7, 8 и 9 баллов соответствуют ускорения 100, 200 и 400 см/с<sup>2</sup> соответственно. Настораживает использование таких «круглых» значений. При создании шкалы MSK-64 записей сильных движений было недостаточно. Более или менее надежно можно было оценить значение ускорений только для 6 баллов. Для более высоких интенсивностей оценки получались путем экстраполяции при предположении об удвоении амплитуды ускорения при возрастании интенсивности на балл. Такое предположение связано с тем, что наблюдаемый диапазон ускорений 1-1000 см/с<sup>2</sup> примерно соответствует диапазону интенсивностей 2-12 баллов. Но оказалось, что ускорения насыщаются при 9.5 баллах и далее не растут. Более высоких напряжений горные породы не выдерживают. Эмпирические данные показали, что на поверхности разлома ускорения не зависят от магнитуды [Садовский и др., 1983; Hanks, Johnson, 1976; Trifunac, 1976; McGuire, Barnhard, 1979; Herrmann, Goetz, 1981; Bureau, 1981; Campbell, 1981; Bolt, Abrahamson, 1982; Составление..., 1999; Bommer, Martinez-Pereira, 2000; Bommer et al., 2004; de Nardis et al., 2014; Suzuki, Iervolino, 2017; Pacor et al., 2018; Huang, 2020; Zaalishvili et al., 2020]. Разбрасывая диапазон ускорений 1-1000 см/с<sup>2</sup> на интенсивности 2-9 баллов получаем увеличение амплитуды ускорения в 2,5 раза на балл, что подтвердилось и прямыми эмпирическими наблюдениями. В итоге в нашем СП для 9 баллов имеем 400 см/с<sup>2</sup>, а по эмпирическим данным у нас получено 700 см/с<sup>2</sup>, а в США – 800 см/с<sup>2</sup>. Разница в 14% объясняется тем, что в США при расчетах использовались записи последних 8 землетрясений. В это время количество станций в непосредственной близости к разлому существенно возросло, что привело к уменьшению продолжительности колебаний и возрастанию амплитуд.

Обозначим номинальную вероятность превышения на картах сейсмической опасности символом  $h_n = 50\%$ . Приращение вероятности превышения воздействий вследствие ошибок в шкале MSK-64 обозначим символом  $h_3$ . Для 7 баллов имеем  $h_3 = 10\%$ , для 8 баллов  $h_3 = 40\%$ , и для 9 баллов  $h_3 = 75\%$ .

Суммируя все составляющие приращений вероятности, получаем:

для 7 баллов  $h = 50 + 10 + 40 + 10 = 110\%$ ;

для 8 баллов  $h = 50 + 5 + 40 + 40 = 135\%$ ;

для 9 баллов  $h = 50 + 1 + 40 + 75 = 166\%$ .

Таким образом, в 9-тибалльной зоне расчеты ведутся на воздействия около 7,3 балла. И это без учета погрешностей, связанных с неоднозначностью пересчетов баллов в ускорения [Neuman, 1954; Murphy, O'Brien, 1977]. По эмпирическим данным фиксированным интенсивностям в баллах соответствует диапазон ускорений, более порядка.

### Выводы

Приведенные оценки вероятности превышения воздействий на картах ОСР не соответствуют действительности. Оценки воздействий по шкале MSK-64 также сильно занижены по уровню. В настоящее время согласно нашим нормам расчеты зданий и сооружений ведутся более чем на балл ниже реальных воздействий. Это ведет к тому, что ущерб от землетрясений в нашей стране намного выше, чем, например, в США и Японии. Экономисты должны оценить допустимый уровень риска. Полученные ими результаты должны быть учтены в нормативных документах.

### Литература

1. Аптикаев Ф. Ф. Новые строительные нормы: шаг вперед, два шага назад. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10 (2). – С. 71-91. DOI: 10.46698/VNC.2020.50.57.005.
2. Аптикаев Ф. Ф. О картах ОСР в ускорениях. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11 (1). – С. 95-103. DOI: 10.46698/VNC.2021.24.94.008.
3. Медведев С. В. Определение интенсивности колебаний. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1978. – Вып. 19. – С. 108-105.
4. Садовский М. А., Писаренко В. Ф., Штейнберг В. В. О зависимости энергии землетрясения от объема очага. // ДАН СССР. – 1983. – Т. 221. № 3. – С. 598-602.
5. Составление карты детального сейсмического районирования Ставропольского края. Т. 1 – 6. – М.: Изд-во ИФЗ РАН, 1999.
6. Уломов В. И. Районирование сейсмической опасности на территории России. // Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. Информационно-аналитический бюллетень Министерства Российской Федерации по чрезвычайным ситуациям. – 1994. – Т. 1. № 1. – С. 41-52.
7. Bolt B. A., Abrahamson N. A. New attenuation relations for peak and expected accelerations of strong ground motions. // BSSA. – 1982. – Vol. 72. – pp. 2307-2321.
8. Bommer J. J., Martinez-Pereira A. Strong-motion parameters: definition, usefulness and predictability. // Proceedings of the XII World Conference on Earthquake Engineering (Auckland, January 1 – February 4, 2000). – Auckland, New Zealand, 2000. – Paper No. 0206.
9. Bommer J. J., Abrahamson N. A., Strasser F. O., Pecker A., Bard P. Y., Bungum H., Studer, J. The challenge of defining upper bounds on earthquake ground motions. // Seismological Research Letters – 2004. – Vol. 75 (1). – pp. 82-95. <https://doi.org/10.1785/gssrl.75.1.82>
10. Bureau G. J. Near-source peak ground acceleration. // Earthquake Notes. – 1981. – Vol. 52. No. 1. – p. 81.
11. Campbell K. W. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1981. – Vol. 71. No. 6. – pp. 2039-2070.
12. De Nardis R., Filippi L., Costa G., Suhadolc P., Nicoletti M., & Lavecchia G. Strong motion recorded during the Emilia 2012 thrust earthquakes (Northern Italy): a comprehensive analysis. // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2014. – Vol. 12 (5). – pp. 2117-2145. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9614-0>

13. Hanks T. S., Johnson D.A. Geophysical assessment of peak accelerations. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1976. – Vol. 66. No. 3. – pp. 959-968.
14. Herrmann R. B., Goertz M.J. A numerical study of peak ground motion scaling. // *BSSA*. – 1981. – Vol. 71. – pp. 2071-2095.
15. Huang Jyun-Yan, Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kuo Chun-Hsiang, Wen Kuo-Liang, Chen Chun-Te. Progress of Soil Nonlinearity Researches of Recent Years in Russia and Taiwan. // *Geology and Geophysics of Russian South*. – 2020. – Vol. 10 (2). – pp. 95-112. DOI: 10.46698/VNC.2020.28.93.007
16. McGuire R. K., Barnhard T. P. The usefulness of ground motion duration in predicting the severity of seismic shaking. Preprint. – 1979. – 17 p.
17. Murphy J. R., O'Brien L. J. The correlation of peak acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters. // *BSSA*. – 1977. – Vol. 67 (3). – pp. 877-915.
18. Neumann R. Earthquake intensity and related ground motion. – Seattle, Univ. Wash. Press, 1954. – 77 p.
19. Pacor F., Felicetta C., Lanzano G., Sgobba S., Puglia R., D'Amico M., Iervolino I. NESS1: A Worldwide Collection of Strong-Motion Data to Investigate Near-Source Effects. // *Seismological Research Letters*. – 2018. – Vol. 89 (6). – pp. 2299-2313. <https://doi.org/10.1785/0220180149>
20. Suzuki A., Iervolino I. Italian vs worldwide history of largest PGA and PGV. // *Annals of Geophysics*. – 2017. – Vol. 60 (5). – Article S0551. <https://doi.org/10.4401/ag-7391>
21. Trifunac M. D. Preliminary analysis of the peaks strong earthquake ground motion-dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance, and recording site conditions. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1976. – Vol. 66. No. 1. – pp. 189-219.
22. Zaalishvili V.B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O. G, Melkov D. A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. // *Geology and Geophysics of Russian South*. – 2020. – Vol. 10 (3). – pp. 94-113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006.

## References

1. Aptikaev F. F. New Building Codes: one step forward, two steps backward. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2020. Vol. 10 (2). pp. 71-91. DOI: 10.46698/VNC.2020.50.57.005. (in Russ.)
2. Aptikaev F. F. About GSZ maps in acceleration units. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2021. Vol. 11 (1). pp. 95-103. DOI: 10.46698/VNC.2021.24.94.008. (in Russ.)
3. Medvedev S. V. Determination of intensity oscillations. *Questions of engineering seismology*, 1978. Vol. 19. pp. 108-116. (In Russ.)
4. Sadovsky M.A., Pisarenko V.F., Shteinberg V.V. On the dependence of the earthquake energy on the volume of the source. *DAN USSR*, 1983. Vol. 221. No. 3. pp. 598-602. (In Russ.)
5. Drawing up a map of detailed seismic zoning of the Stavropol Territory. T. 1 – 6. Moscow. IPZ RAN, 1999. (In Russ.)
6. Ulomov V.I. Seismic hazard zoning in Russia Federal system of seismological observations and earthquake prediction. *Information-analytical Bulletin of the Ministry of the Russian Federation for emergency situations*, 1994. Vol. 1. No. 1. pp. 41-52. (In Russ.)
7. Bolt B.A., Abrahamson N.A. New attenuation relations for peak and expected accelerations of strong ground motions. *BSSA*, 1982. Vol. 72. pp. 2307-2321.
8. Bommer J.J., Martinez-Pereira A. Strong-motion parameters: definition, usefulness and predictability. *Proceedings of the XII World Conference on Earthquake Engineering (Auckland, January 1 – February 4, 2000)*. Auckland, New Zealand, 2000. Paper No. 0206.
9. Bommer J.J., Abrahamson N.A., Strasser F. O., Pecker A., Bard P.Y., Bungum H., Studer, J. The challenge of defining upper bounds on earthquake ground motions. *Seismological Research Letters*, 2004. Vol. 75 (1). pp. 82-95. <https://doi.org/10.1785/gssrl.75.1.82>
10. Bureau G.J. Near-source peak ground acceleration. *Earthquake Notes*, 1981. Vol. 52. No. 1. 81 p.

11. Campbell K. W. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1981. Vol. 71. No. 6. pp. 2039-2070.
12. De Nardis R., Filippi L., Costa G., Suhadolc P., Nicoletti M., & Lavecchia G. Strong motion recorded during the Emilia 2012 thrust earthquakes (Northern Italy): a comprehensive analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2014. Vol. 12 (5). pp. 2117-2145. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9614-0>
13. Hanks T. S., Johnson D. A. Geophysical assessment of peak accelerations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1976. Vol. 66. No. 3. pp. 959-968.
14. Herrmann R. B., Goertz M. J. A numerical study of peak ground motion scaling. *BSSA*, 1981. Vol. 71. pp. 2071-2095.
15. Huang Jyun-Yan, Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Kuo Chun-Hsiang, Wen Kuo-Liang, Chen Chun-Te. Progress of Soil Nonlinearity Researches of Recent Years in Russia and Taiwan. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2020. Vol. 10 (2). pp. 95-112. DOI: 10.46698/VNC.2020.28.93.007
16. McGuire R. K., Barnhard T. P. The usefulness of ground motion duration in predicting the severity of seismic shaking. Preprint, 1979. 17 p.
17. Murphy J. R., O'Brien L. J. The correlation of peak acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters. *BSSA*, 1977. Vol. 67 (3). pp. 877-915.
18. Neumann R. Earthquake intensity and related ground motion. Seattle, Univ. Wash. Press, 1954. 77 p.
19. Pacor F., Felicetta C., Lanzano G., Sgobba S., Puglia R., D'Amico M., Iervolino I. NESS1: A Worldwide Collection of Strong-Motion Data to Investigate Near-Source Effects. *Seismological Research Letters*, 2018. Vol. 89 (6). pp. 2299-2313. <https://doi.org/10.1785/0220180149>
20. Suzuki A., Iervolino I. Italian vs worldwide history of largest PGA and PGV. *Annals of Geophysics*, 2017. Vol. 60 (5). Article S0551. <https://doi.org/10.4401/ag-7391>
21. Trifunac M. D. Preliminary analysis of the peaks strong earthquake ground motion-dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance, and recording site conditions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1976. Vol. 66. No. 1. pp. 189-219.
22. Zaalishvili V. B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O. G., Melkov D. A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2020. Vol. 10 (3). pp. 94-113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006.

УДК 532 (075.8)

DOI: [10.46698/VNC.2021.23.31.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.23.31.006)

Оригинальная статья

## Механико-математическое моделирование сейсмических сдвиговых колебаний ледникового массива

И. Д. Музаев , К. С. Харебов , Н. И. Музаев 

Геофизический институт Владикавказского научного центра  
Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ,  
ул. Маркова, 93а, e-mail: [kosta7x7@yandex.ru](mailto:kosta7x7@yandex.ru)

Статья поступила: 01.06.2021, доработана: 07.07.2021, принята к публикации: 15.07.2021

**Резюме: Актуальность работы.** В статье впервые в мире разработаны теоретические положения сдвиговых сейсмических колебаний ледникового массива. Актуальность представленных научных разработок в приложении к инженерной сейсмологии и гляциологии обусловлено тем, что в недавнее время в различных регионах нашей планеты имели место внезапные срывы с гор грандиозных масс льда, что приводило к образованию мощных гляциальных селевых потоков. Эти потоки уничтожали населенные пункты и народохозяйственные объекты с многочисленными жертвами. Все мы помним катастрофический сход ледника Колка в Геналдонском ущелье в 2002 г., унесшего 125 человеческих жизней. Причиной срыва ледяных масс со своих подстилающих поверхностей примерзаний является динамическое воздействие, в качестве которого мы рассматриваем землетрясение. **Цель исследования.** На основе современных научных методов механики сплошных сред проведение механико-математического компьютерного моделирования колебательного процесса в ледниковом массиве, когда колебание спровоцировано гармонической сейсмической волной, упавшей на подстилающую поверхность примерзания массива. В рамках выполненного моделирования содержится постановка и решение соответствующей начально-краевой задачи. Начальными данными являются как физико-механические характеристики льда, его плотность, модуль сдвига, коэффициент внутреннего (вязкого) сопротивления, так и геометрические размеры и непризматическая конфигурация массива. Искомыми величинами в поставленной начально-краевой задаче являются перемещения и напряжения, как в самом теле массива, так и на подстилающей поверхности примерзания. **Методы исследования.** Составленная модель представляет собой начально-краевую задачу математической физики для дифференциального уравнения гиперболического типа, в котором один коэффициент является комплексной величиной, названной комплексным модулем сдвига согласно с гипотезой Е. С. Сорокина, а другой коэффициент является переменной величиной, зависящей от пространственной координаты. Эти два особых фактора создают трудности в аналитическом способе решения начально-краевых задач. В представленной работе найден путь решения поставленной задачи в частном случае – при экспоненциальной зависимости переменного коэффициента от пространственной координаты. **Результаты работы.** Получена совокупность расчётных формул для вычисления напряжений и деформаций в ледниковом массиве. Доказано утверждение о том, что низкочастотная сейсмическая около-резонансная волна может отколоть ледниковый массив от подстилающей поверхности примерзания, что приведет к образованию гляциального селевого потока.

**Ключевые слова:** ледниковый массив, комплексный модуль сдвига, поперечное сдвиговое колебание, упруго-вязкая среда, гипотеза Е. С. Сорокина, гипотеза Кельвина-Фойгта, начально-краевая задача.

**Для цитирования:** Музаев И. Д., Харебов К. С., Музаев Н. И. Механико-математическое моделирование сейсмических сдвиговых колебаний ледникового массива. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (3): 63 – 75. DOI: [10.46698/VNC.2021.23.31.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.23.31.006).



DOI: [10.46698/VNC.2021.23.31.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.23.31.006)

Original paper

## Mechanical and mathematical modeling of seismic shear vibrations of a glacial massif

I. D. Muzaev , K. S. Harebov , N. I. Muzaev 

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: [kosta7x7@yandex.ru](mailto:kosta7x7@yandex.ru)

Received: 01.06.2021, revised: 07.07.2021, accepted: 15.07.2021

**Abstract: Relevance.** Theoretical studies of seismic oscillations of the glacial massif are an urgent task in the field of engineering seismology and glaciology. This statement is confirmed if we recall the case of the sudden catastrophic collapse of the Kolka glacier in 2002, which claimed the lives of 125 human lives. **Aim.** Conducting a mechanical and mathematical simulation of the oscillatory process in a glacial massif, when the oscillation is triggered by a harmonic seismic wave that has fallen on the underlying surface of the frozen massif. Formulation and solution of the initial boundary value problem for calculating stresses and deformations in a glacial massif. **Methods.** The compiled model represents an initial boundary value problem of mathematical physics for a hyperbolic differential equation, in which one coefficient is a complex quantity called the complex shift modulus according to the hypothesis of E. S. Sorokin, and the other coefficient is a variable value depending on the spatial coordinate. These two special factors create difficulties in the analytical way of solving initial-boundary value problems. In the present paper, we find a way to solve the problem in the special case – with an exponential dependence of the variable coefficient on the spatial coordinate. **Results.** A set of calculation formulas for calculating stresses and deformations in the glacial massif is obtained. It is proved that a low-point seismic near-resonant wave can break off the glacial massif from the underlying freezing surface, which will lead to the formation of a glacial mudflow.

**Keywords:** glacial massif, complex shear modulus, transverse shear vibration, elastic-viscous medium, E. S. Sorokin hypothesis, Kelvin-Voigt hypothesis, initial-boundary value problem.

**For citation:** Muzaev I. D., Harebov K. S., Muzaev N. I. Mechanical and mathematical modeling of seismic shear vibrations of a glacial massif. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2021. 11 (3): 63 – 75. DOI: [10.46698/VNC.2021.23.31.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.23.31.006).

### Введение

**Постановка задачи.** Известно, что поперечные сдвиговые колебания массивов горной породы, распластанных на откосах (оползневые участки, отвалы, земляные плотины, дамбы, материал хвостохранилища в виде дамбы и др.) механико-математически наиболее адекватно моделируются начально-краевыми задачами, поставленными для следующих дифференциальных уравнений в частных производных [Ворович и др., 1999; Кошляков и др., 1970; Завриев и др., 1970; Прочность. Устойчивость. Колебания, 1968; Скучик, 1971; Слепян, 1972; Шульман, 1976; Vonnet, Heize, 1995].

$$\rho B \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - G(1 + i\eta) \frac{\partial}{\partial x} \left( B \frac{\partial U}{\partial x} \right) = \rho g B \sin \alpha, \quad (1)$$

$$\rho B \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - G \frac{\partial}{\partial x} \left( B \frac{\partial U}{\partial x} \right) - \beta G \frac{\partial}{\partial x} \left( B \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial t} \right) = \rho g B \sin \alpha, \quad (2)$$

где приняты следующие обозначения:  $\rho$  – плотность материала массива,  $B(x)$  – переменная ширина массива, зависящая от пространственной координаты  $x$ ,  $G$  – модуль сдвига материала массива,  $U(x, t)$  – сдвиговые колебательные перемещения в массиве,  $i$  – мнимая единица,  $t$  – время.

Согласно гипотезе Е. С. Сорокина [Сорокин, 1956], в дифференциальном уравнении (1) через постоянный коэффициент  $\eta$  (в дальнейшем называемый коэффициентом потерь) учтена диссипация энергии колебания на преодоление внутреннего сопротивления в среде. В дифференциальном уравнении (2) диссипация энергии учтена через коэффициент  $\beta$  (называемый коэффициентом вязкого сопротивления) в согласии с гипотезой Кельвина-Фойгта [Прочность. Устойчивость. Колебания, 1968; Скучик, 1971; Слепян, 1972]. Оба этих априорных коэффициента при гармоническом колебании среды взаимосвязаны зависимостью:

$$\eta = \beta\omega, \quad (3)$$

где  $\omega$  – круговая частота гармонических колебаний массива.

В современной теоретической гляциологии лёд в ледниковых массивах рассматривается как упруго-вязкая среда со своими коэффициентами упругости и вязкости [Ewing et al., 1934; Glen, Perutz, 1954; Jellinek, Brill, 1956; Войтковский, 1960; Прочность. Устойчивость. Колебания, 1968; Скучик, 1971; Слепян, 1972]. В связи с этим, ниже принимается предположение о том, что при колебании ледникового массива упруго-вязкие составляющие деформации также моделируются дифференциальными уравнениями (1) и (2) в зависимости от гипотез Е. С. Сорокина либо Кельвина-Фойгта.

На рисунке 1 представлен схематический чертеж и расчетная схема задачи теоретической сейсмологии (применительно к гляциологии) о поперечном сдвиговом колебании ледникового массива, когда колебание спровоцировано падением гармонической сейсмической волны на поверхность откоса примерзания массива. Координатная ось  $ox$  направлена вдоль толщины массива, а сейсмическая волна распространяется вдоль откоса.

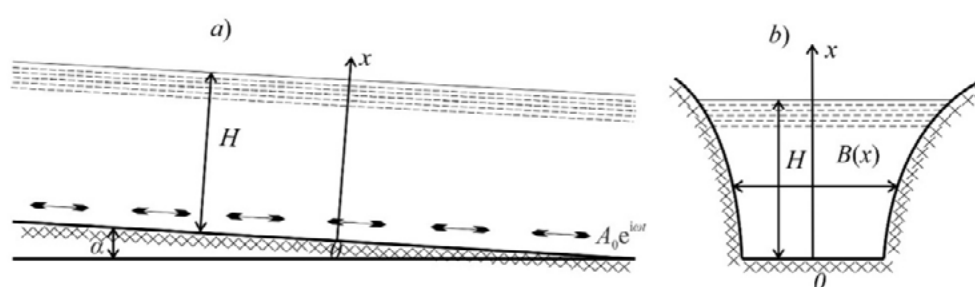


Рис. 1. Схематический чертеж и расчетная схема задачи сейсмических колебаний ледникового массива. а) продольный разрез массива б) поперечное сечение массива и ущелья /

Fig. 1. Schematic drawing and calculation scheme of the problem of the glacial massif seismic vibrations. a) the longitudinal section of the massif b) the cross section of the massif and the gorge

В пределах гипотезы Е. С. Сорокина, искомая функция  $U(x, t)$  помимо дифференциального уравнения, которое в развернутом виде [Музаев и др., 2014; Скучик, 1971; Шумский, 1955] можно представить как:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - a^2(1 + i\eta) \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{B'(x)}{B(x)} \frac{\partial U}{\partial x} \right) = g \sin \alpha, \quad (4)$$

должна удовлетворять следующим граничным и начальным условиям [Ворович и др., 1999; Шумский, 1955]:

$$U(x, t)|_{x=0} = A_0 e^{i\omega t}, \quad \left. \frac{\partial U(x, t)}{\partial x} \right|_{x=H} = 0, \quad (5)$$

$$U(x, t)|_{t=0} = U_0(x), \quad \left. \frac{\partial U(x, t)}{\partial t} \right|_{t=0} = 0, \quad A_0 = \frac{k_s g}{\omega^2}, \quad (6)$$

где  $k_s$  – сейсмический коэффициент местности,  $\omega = 2\pi\nu$  – круговая частота колебания сейсмической волны, падающей на подстилающую поверхность примерзания ледникового массива к откосу,  $\nu$  – частота в герцах,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $U_0(x)$  – начальные сдвиговые перемещения в массиве обусловленные составляющей силы тяжести, направленной вдоль откоса,  $a$  – скорость распространения поперечной сдвиговой волны в среде.

### Методы работы

Дифференциальное уравнение (4), граничные условия (5) и начальные условия (6) в совокупности представляют начально-краевую задачу математической физики и моделируют сдвиговые сейсмические колебания ледникового массива.

При известной функции  $U(x, t)$  касательные сейсмонапряжения в теле массива определяются в результате дифференцирования этой функции по пространственной координате  $x$ , умножения на модуль сдвига  $G(1 + i\eta)$ , а затем выделения из полученного выражения действительной части [Прочность. Устойчивость. Колебания, 1968; Скучик, 1971].

$$\tau(x, t) = \operatorname{Re} G(1 + i\eta) \frac{\partial U(x, t)}{\partial x}. \quad (7)$$

Физико-механические характеристики материала массива  $\rho$ ,  $G$  и  $a$ , а также характеристики падающей сейсмической волны  $k_s$  и  $\omega$  считаются заданными постоянными величинами.

Один коэффициент дифференциального уравнения (4)  $1 + i\eta$  является комплексной величиной. Другой коэффициент  $\frac{B'(x)}{B(x)}$  в общем случае зависит от координаты  $x$ . В связи с этим решение поставленной начально-краевой задачи аналитическими методами математической физики связано с большими математическими трудностями и для произвольной функции  $B(x)$  задача никем не решена.

Путь решения вышеставленной начально-краевой задачи (4) – (7) существенно упрощается, если переменную ширину массива (т. е. переменную ширину горного ущелья ледника) аппроксимировать экспоненциальной функцией вида:

$$B(x) = B_0 e^{Sx}, \quad S = \frac{1}{H} \ln \frac{B(H)}{B(0)}. \quad (8)$$

Формпараметр  $S$  – характеризует криволинейную трапецидальную конфигурацию поперечного сечения ледникового массива, где  $B_0 = B(0)$  и  $B(H)$  – ширины поперечного сечения соответственно на поверхности примерзания и на свободной поверхности ледникового массива (рис. 1).

При таком вполне приемлемом упрощающем предположении переменный коэффициент дифференциального уравнения (4) становится постоянной величиной, а само уравнение принимает следующий вид:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - a^2(1 + i\eta) \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + S \frac{\partial U}{\partial x} \right) = g \sin \alpha, \quad (9)$$

Граничные и начальные условия (5) и (6) не изменяются.

Приступив к решению поставленной начально-краевой задачи целесообразно в начале применить следующую подстановку [Кошляков и др., 1970; Bonnet, Heize, 1995]:

$$U(x, t) = e^{-\frac{S}{2}x} (V(x, t) + U_0(x)) + A_0 e^{i\omega t}, \quad A_0 = \frac{k_s g}{\omega^2}, \quad (10)$$

где  $A_0 = \frac{k_s g}{\omega^2}$ , при  $t > 0$ .

Дифференциальное уравнение (4), граничные условия (5) и начальные условия (6) относительно нововведенной искомой функции  $V(x, t)$  приводятся к следующим видам:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} - a^2(1 + i\eta) \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - \frac{S^2}{4} V \right) = A_0 \omega^2 e^{i\omega t} e^{\frac{S}{2}x}, \quad (11)$$

$$V(x, t)|_{x=0} = 0, \quad \left( \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} - \frac{S}{2} V(x, t) \right) \Big|_{x=H} = 0, \quad (12)$$

$$V(x, t)|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0. \quad (13)$$

Очевидно, что стационарное перемещение  $U_0(x)$  обусловлено составляющей силы тяжести вдоль склона. В связи с этим имеют место следующие равенства:

$$\frac{d^2 U_0}{dx^2} + \frac{S}{2} U_0 = g \sin \alpha e^{\frac{S}{2}x}, \quad U_0|_{x=0} = 0; \quad U_0'|_{x=H} = 0. \quad (14)$$

Рассмотрим следующую последовательность тригонометрических функций [Кошляков и др., 1970; Bonnet, Heize, 1995]:

$$\sin \mu_1 \frac{x}{H}, \quad \sin \mu_2 \frac{x}{H}, \dots, \sin \mu_n \frac{x}{H}, \dots \quad (15)$$

где упорядоченная последовательность действительных чисел  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n, \dots$  представляет положительные корни следующего трансцендентного уравнения:

$$\mu \cos \mu - \frac{SH}{2} \sin \mu = 0. \quad (16)$$

Непосредственной проверкой можно доказать, что последовательность функций (15) является ортогональной системой тригонометрических функций на интервале  $(0; H)$ , где  $H$  – толщина (мощность) ледникового массива, а  $S$  – формпараметр поперечного сечения ледникового массива [Прочность. Устойчивость. Колебания, 1968; Bonnet, Heize, 1995].

В связи с вышеизложенным, решение дифференциального уравнения (11) удовлетворяющего граничным условиям (12) можно искать в виде следующего тригонометрического ряда по ортогональной системе функций (15):

$$V(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n(t) \sin \mu_n \frac{x}{H}, \dots \quad (17)$$

Непосредственной проверкой можно доказать, что выражение (17) удовлетворяет граничным условиям (14) при условии, что числа  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n, \dots$  являются положительными корнями трансцендентного уравнения (16).

С целью определения неизвестных функций  $V_n(t)$ ,  $n=1,2,3,\dots$  подставим ряд (17) в дифференциальное уравнение (11), предварительно разложив функцию  $e^{\frac{s}{2}x}$  в ряд Фурье по синусам по ортогональной системе функций (15). Затем приравняем коэффициенты при одинаковых синусах в правой и левой частях. В результате всего этого относительно искомой функции  $V_n(t)$ ,  $n=1,2,3,\dots$  получается следующее обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 V_n}{dx^2} + a^2(1 + i\eta) \left( \frac{\mu_n^2}{H^2} + \frac{S^2}{4} \right) V_n = A_0 \omega^2 \gamma_n e^{i\omega t} \quad (18)$$

с двумя начальными условиями:

$$V_n(t)|_{t=0} = 0, \quad \frac{dV_n(x,t)}{dt} \Big|_{t=0} = 0, \quad (19)$$

где  $\gamma_n$  – коэффициенты Фурье в разложении функции  $e^{\frac{s}{2}x}$  в ряд Фурье [Кошляков и др., 1970; Bonnet, Heize, 1995].

$$\gamma_n = \frac{\int_0^H e^{\frac{s}{2}x} \sin \mu_n \frac{x}{H} dx}{\int_0^H \sin^2 \mu_n \frac{x}{H} dx} \quad n = 1, 2, \dots \quad (20)$$

Решение дифференциального уравнения (18) с комплексным коэффициентом целесообразно искать в виде следующей комплексной функции:

$$V_n(t) = Y_{1,n}(t) + iY_{2,n}(t). \quad (21)$$

Тогда задача Коши (18) (19) для дифференциального уравнения с комплексным коэффициентом приводится к решению следующей системы двух дифференциальных уравнений с действительными коэффициентами:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 Y_{1,n}}{dt^2} + a^2 r_n^2 Y_{1,n} - a^2 r_n^2 \eta Y_{2,n} &= A_0 \omega^2 \gamma_n \cos \omega t, \\ \frac{d^2 Y_{2,n}}{dt^2} + a^2 r_n^2 Y_{2,n} + a^2 r_n^2 \eta Y_{1,n} &= A_0 \omega^2 \gamma_n \sin \omega t, \end{aligned} \quad (22)$$

и со следующими начальными условиями:

$$Y_{1,n}(t) \Big|_{t=0} = \frac{dY_{1,n}(t)}{dt} \Big|_{t=0} = 0 \quad (23)$$

$$Y_{2,n}(t) \Big|_{t=0} = \frac{dY_{2,n}(t)}{dt} \Big|_{t=0} = 0, \quad (24)$$

где  $r_n = \sqrt{\frac{\mu_n^2}{H^2} + \frac{S^2}{4}}$ ,  $n=1,2$ .

Путем исключения система дифференциальных уравнений (22) приводится к следующим двум дифференциальным уравнениям четвертого порядка:

$$\frac{d^4 Y_{1,n}}{dt^4} + 2a^2 r_n^2 \frac{d^2 Y_{1,n}}{dt^2} + a^4 r_n^4 (1 + \eta^2) Y_{1,n} = M_1 \cos \omega t + M_2 \sin \omega t, \quad (25)$$

$$\frac{d^4 Y_{2,n}}{dt^4} + 2a^2 r_n^2 \frac{d^2 Y_{2,n}}{dt^2} + a^4 r_n^4 (1 + \eta^2) Y_{2,n} = -M_2 \cos \omega t + M_1 \sin \omega t, \quad (26)$$

$$M_1 = A_0 \omega^2 \gamma_n (a^2 r_n^2 - \omega^2), \quad M_2 = A_0 \omega^2 \gamma_n a^2 r_n^2 \eta \quad (27)$$

с начальными условиями (23) – (24) соответственно.

Решения дифференциальных уравнений (25) и (26) ограниченные на бесконечности при  $t \rightarrow \infty$  и удовлетворяющие нулевым начальным условиям (23) имеют следующие виды:

$$\begin{aligned} Y_{1,n}(t) &= M_1(\cos \omega t - e^{-\alpha_n t} \cos \beta_n t) + M_2 \left( \sin \omega t - \frac{\omega}{\beta_n} e^{-\alpha_n t} \sin \beta_n t \right) - \frac{\alpha_n}{\beta_n} M_1 e^{-\alpha_n t} \sin \beta_n t, \\ Y_{2,n}(t) &= -M_2 \left( \cos \omega t - e^{-\alpha_n t} \cos \beta_n t - \frac{\alpha_n}{\beta_n} e^{-\alpha_n t} \sin \beta_n t \right) + M_1 \left( \sin \omega t - \frac{\omega}{\beta_n} e^{-\alpha_n t} \sin \beta_n t \right) \end{aligned} \quad (28)$$

где  $\alpha_n = ar_n \sqrt{\frac{\sqrt{1+\eta^2}-1}{2}}$ ,  $\beta_n = ar_n \sqrt{\frac{\sqrt{1+\eta^2}+1}{2}}$ ,  $\gamma_n = \frac{4\mu_n \int_0^H e^{\frac{S}{2}x} \sin \mu_n \frac{x}{H} dx}{(2\mu_n - \sin 2\mu_n)H}$ .

Обратным ходом, следуя по выражениям (17), (11), (10) и (8) для вычисления сдвиговых сеймонапряжений на поверхности примерзания ледникового массива получается следующая совокупность расчетных формул:

$$\tau(0, t) = \frac{2A_0G}{H} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{a^2 r_n^2 \omega^2 (1+\eta^2) - \omega^4}{\Delta} \Psi_{1,n}(t) + \frac{\eta \omega^4}{\Delta} \Psi_{2,n}(t) \right], \quad (29)$$

где

$$r_n = \sqrt{\frac{\mu_n^2}{H^2} + \frac{S^2}{4}},$$

$$\Psi_{1,n}(t) = \cos \omega t - e^{-\alpha_n t} \cos \beta_n t - \frac{\alpha_n}{\beta_n} e^{-\alpha_n t} \sin \beta_n t,$$

$$\Psi_{2,n}(t) = \sin \omega t - \frac{\omega}{\beta_n} e^{-\alpha_n t} \sin \beta_n t,$$

$$\alpha_n = \frac{\sqrt{2}}{2} ar_n \sqrt{\sqrt{1+\eta^2}-1}, \beta_n = \frac{\sqrt{2}}{2} ar_n \sqrt{\sqrt{1+\eta^2}+1},$$

$$\gamma_n = \frac{4\mu_n^2}{(2\mu_n - \sin 2\mu_n) \left( \mu_n^2 + \left( \frac{SH}{2} \right)^2 \right)}$$

$$\Delta = (a^2 r_n^2 - \omega^2)^2 + (a^2 r_n^2 \eta)^2,$$

$\mu_n, n = 1, 2, \dots$  – положительные корни следующего характеристического трансцендентного уравнения  $\mu \cos \mu - \frac{SH}{2} \sin \mu = 0$ ,  $\eta$  – коэффициент потерь в ледниковом массиве согласно с гипотезой Е. С. Сорокина.

При нулевом значении формпараметра  $S=0$  совокупность расчетных формул (29) упрощается и приводится к виду:

$$\tau(0, t) = \frac{2A_0G}{H} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{a^2 a_n^2 \omega^2 (1+\eta^2) - \omega^4}{\Delta} \Psi_{1,n}(t) + \frac{\eta \omega^4}{\Delta} \Psi_{2,n}(t) \right] \quad (30)$$

где  $a_n = \frac{(2n-1)\pi}{2H}$ ,  $\alpha_n = \frac{\sqrt{2}}{2} aa_n \sqrt{\sqrt{1+\eta^2}-1}$ ,  $\beta_n = \frac{\sqrt{2}}{2} aa_n \sqrt{\sqrt{1+\eta^2}+1}$ ,

$$\Delta = (a^2 a_n^2 - \omega^2)^2 + (a^2 a_n^2 \eta)^2.$$

### Результаты работы

На примере сошедшего 20.09.2002 г. ледника Колка [Бергер, 2018; Заалишвили, Харебов, 2014; Котляков и др., 2014] проведены вычислительные эксперименты на компьютере по совокупности полученных расчётных формул (30). Входным пара-

метрам присваивались следующие числовые значения [Музаев и др., 2014; Музаев, Созанов, 2019]: толщина (мощность) ледникового массива  $H=108\text{ м}$ ; модуль сдвига льда  $G=0,38 \cdot 10^{10}\text{ Па}$ . Круговой частоте, падающей на массив сейсмической волны, придавали следующие околорезонансные значения  $\omega=1,05\omega_r$ ;  $1,03\omega_r$ ;  $1,01\omega_r$ ;  $0,95\omega_r$ ;  $0,97\omega_r$ ;  $0,99\omega_r$ , где  $\omega_r = aa_1 = \frac{a\pi}{2H}$  – представляет круговую частоту первой основной формы собственных колебаний массива. Коэффициенту потерь придавался следующий ряд значений  $\eta = 0$ ;  $0,00032$ ;  $0,0032$ ;  $0,032$ ;  $0,32$ . На рисунках 2-4 представлены графики зависимости  $\tau_1(t)$  и  $\tau_2(t)$  от времени  $t$ , где:

$$\tau_1(t) = 2A_0 \frac{G}{H} \frac{a^2 a_1^2 \omega^2 (1 + \eta^2) - \omega^4}{(a^2 a_1^2 - \omega^2)^2 + (a^2 a_1^2 \eta)^2} \Psi_{1,1}(t) + \frac{\eta \omega^4}{(a^2 a_1^2 - \omega^2)^2 + (a^2 a_1^2 \eta)^2} \Psi_{2,1}(t),$$

$$\Psi_{1,1}(t) = \cos \omega t - e^{-\alpha_1 t} \cos \beta_1 t - \frac{\alpha_1}{\beta_1} e^{-\alpha_1 t} \sin \beta_1 t,$$

$$\Psi_{2,1}(t) = \sin \omega t - \frac{\omega}{\beta_1} e^{-\alpha_1 t} \sin \beta_1 t,$$

$$\alpha_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} a a_1 \sqrt{\sqrt{1 + \eta^2} - 1}, \beta_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} a a_1 \sqrt{\sqrt{1 + \eta^2} + 1},$$

$$a_1 = \frac{\pi}{2H}$$

$$\tau_2(t) = 2A_0 \frac{G}{H} \sum_{n=2}^{\infty} \left[ \frac{\omega^2 a^2 a_n^2 (1 + \eta^2) - \omega^4}{\Delta} \Psi_{1,n}(t) + \frac{\eta \omega^4}{\Delta} \Psi_{2,n}(t) \right].$$

Величина  $\tau_1(t)$  является первым резонансным членом ряда (29). Величина  $\tau_2(t)$  представляет собой сумму остальных членов ряда (29), начиная со второго члена.

На рисунке 2 представлен график зависимости сейсмонапряжений  $\tau_1$  и  $\tau_2$  от времени при следующих параметрах: коэффициент потерь  $\eta=0,00032$ ; круговая частота сейсмической волны  $\omega=0,99\omega_r$ , или численно  $\omega=29,34\text{ с}^{-1}$ .

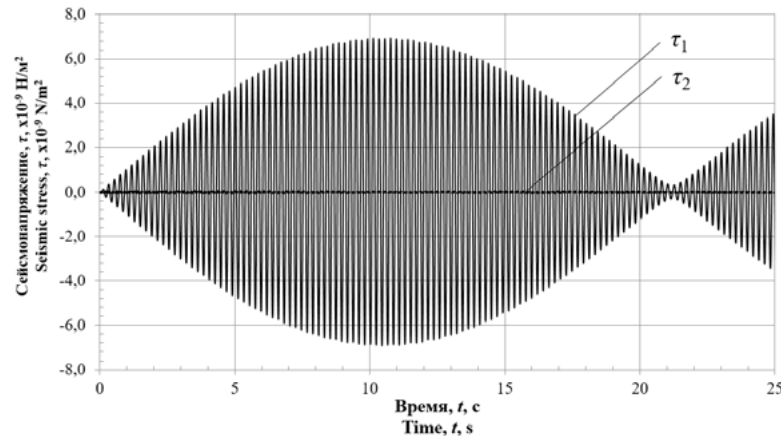


Рис. 2. Графики зависимости сейсмонапряжений  $\tau_1$  и  $\tau_2$  от времени /  
Fig. 2. Graphs of the dependence of seismic stresses  $\tau_1$  and  $\tau_2$  on time

Из рисунка 2 следует, что при данных входных параметрах абсолютная максимальная величина сейсмонапряженности составляет  $6,92 \cdot 10^9\text{ н/м}^2$ , а максимальное абсолютное отношение  $\tau_2/\tau_1=0,085$ .

Если для большей наглядности построить огибающую графика колебаний сейсмонапряженности, то видно, что при приближении круговой частоты сейсмической волны  $\omega$  к круговой частоте первой основной формы собственных колебаний массива сейсмонапряженность растет (рис. 3).

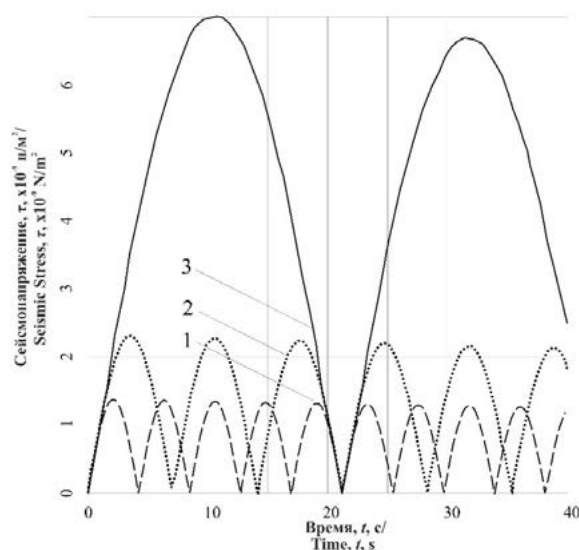


Рис. 3. Графики зависимости сейсмонапряжения от времени при трех значениях околорезонансной круговой частоты. Коэффициент потерь  $\eta=0,0$ ; круговая частота сейсмической волны  $\omega$ : 1- $0,95 \omega_r=28,156 \text{ c}^{-1}$ ; 2- $0,97 \omega_r=28,75 \text{ c}^{-1}$ ; 3- $0,99 \omega_r=29,34 \text{ c}^{-1}$  /

Fig. 3. Graphs of the dependence of the seismic voltage on time at three values of the near-resonant circular frequency. The loss coefficient  $\eta=0.0$ ; the circular frequency of the seismic wave  $\omega$ : 1- $0.95 \omega_r=28.156 \text{ s}^{-1}$ ; 2- $0.97 \omega_r=28.75 \text{ s}^{-1}$ ; 3- $0.99 \omega_r=29.34 \text{ s}^{-1}$

После обработки и анализа результатов вычислительных экспериментов установлены следующие закономерности при сейсмических колебаниях ледникового массива (рис. 4).

Согласно графику, представленному на рисунке 2, при  $\omega=0,95\omega_r$  и  $\eta=0$  ( $\eta=0,32 \cdot 10^{-3}$ ) для максимального значения сейсмического напряжения на подстилающей поверхности примерзания массива получено числовое значение:

$$\tau = 1,3A_0 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2, \quad (31)$$

где  $A_0$  – амплитуда колебания (смещение).

В соответствии с [Аптикаев, 2020; Заалишвили, 2009; Курбацкий, Косауров, 2016; Huang Juun-Yan et al., 2020; Yin-Min Wu et al., 2003] характеристики колебаний при землетрясениях различной интенсивности имеют следующие числовые значения (табл. 1).

При 5-ти балльном землетрясении амплитуда колебания на откосе  $A_0 = 10^{-3}$  м и согласно (31)  $\tau = 1,3 \cdot 10^6$  Па, а при температурах от  $-4^\circ\text{C}$  до  $-1^\circ\text{C}$  разрушающее напряжение для льда составляет  $5,5 \cdot 10^5$  Па. И так как в этом случае сейсмонапряжение превышает разрушающее напряжение в 2,5 раза ледяной поток может полностью отколоться от подстилающей поверхности, что ведет к образованию гляциального селевого потока.

## Выводы

1. Составлена механико-математическая модель о поперечных сдвиговых колебаниях ледникового массива, сцепленного с подстилающим склоном поверхностью примерзания массива, когда колебание обусловлено падением на массив гармонической сейсмической волны. Модель представляет собой начально-краевую задачу математической физики, в которой один из коэффициентов является комплексной



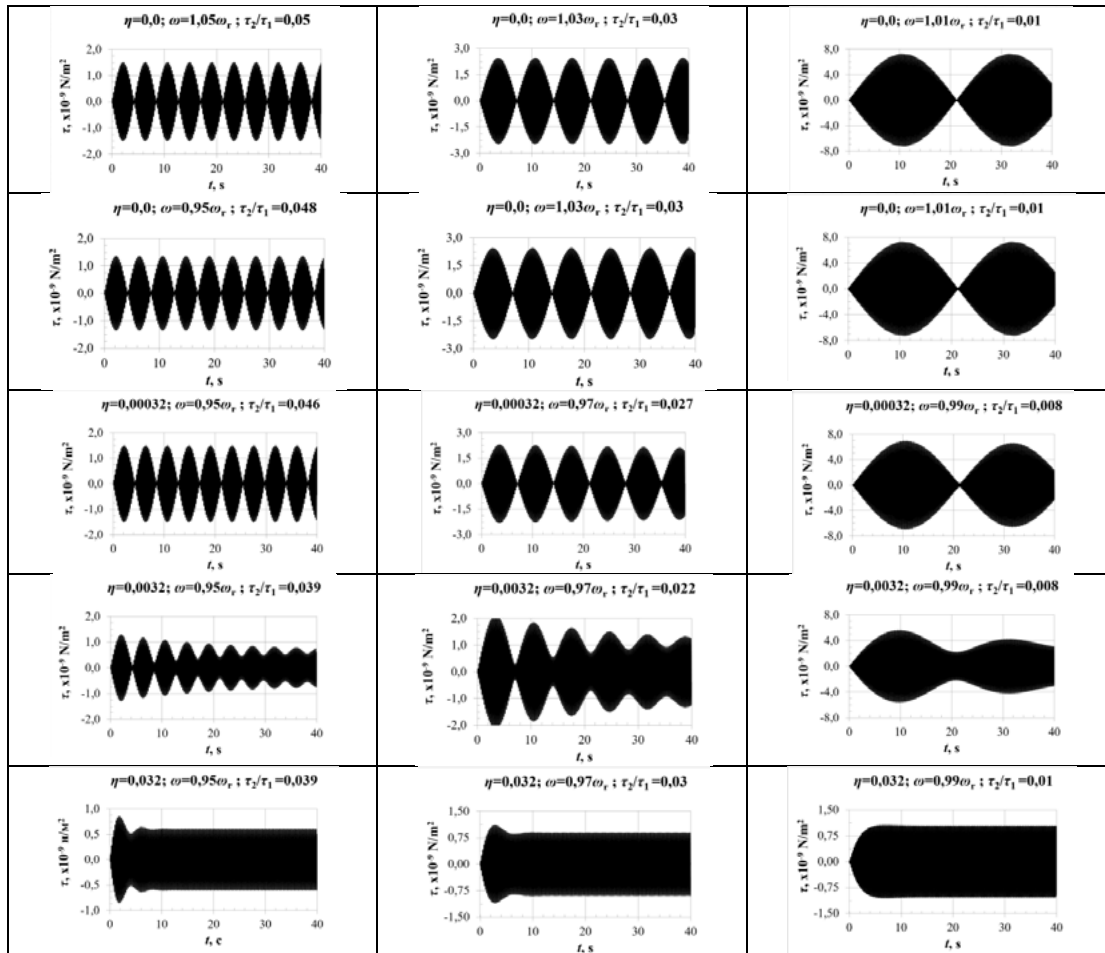


Рис. 4. Графики зависимости сеймонапряжения от времени на поверхности примерзания при различных значениях коэффициента потерь  $\eta$ , и различных значениях околорезонансной круговой частоты  $\omega/\omega_r$

Fig. 4. Graphs of the dependence of the seismic voltage on the time on the freezing surface at different values of the loss coefficient  $\eta$ , and different values of the near-resonant circular frequency  $\omega/\omega_r$

Таблица 1 / Table 1

**Числовые характеристики при землетрясениях различной интенсивности /  
Numerical characteristics for earthquakes of different intensity**

Интенсивность, балл MSK / Intensity, MSK	Ускорение, $10^{-2} \text{ м/с}^2$ / Acceleration, $10^{-2} \text{ м/с}^2$	Скорость, $10^{-2} \text{ м/с}$ / Velocity, $10^{-2} \text{ м/с}$	Смещение, $10^{-3} \text{ м}$ / Displacement, $10^{-3} \text{ м}$	Сейсмический коэффициент $K_c$ / Seismic Coefficient $C_s$
5	12-25	1-2	0,5-1,0	0,008
6	20-50	2,1-4,0	1,1-2,0	0,016
7	50-100	4,1-8,0	2,1-4	0,025
8	100-200	8,1-16,0	4,1-8,0	0,05
9	200-400 400-800	16,1-32,0 32,1-64,0	8,1-16,0 16,1-32,0	0,1

величиной (комплексный модуль сдвига, согласно гипотезе Е. С. Сорокина), а другой коэффициент зависит от пространственной координаты. Оба эти фактора создают трудности при аналитическом решении поставленной начально-краевой задачи.

2. В одном частном виде переменного коэффициента найден путь аналитического решения задачи с вышеприведёнными особенностями. Получена совокупность расчётных формул для вычисления сейсмонапряжений, которые провоцирует падающая на массив сейсмическая волна. Доказано утверждение о том, что низкочастотная сейсмическая волна может сорвать ледниковый массив с поверхности примерзания, в результате чего может образоваться гляциальный селевой поток.

### Литература

1. Аптикаев Ф. Ф. Новые строительные нормы: шаг вперед, два шага назад. // Геология и Геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №2. – С. 71-81. DOI: 10.46698/VNC.2020.50.57.005
2. Бергер М. Г. О противоречивости и необоснованности гляциологических представлений о катастрофической пульсации ледника Колка, её причинах и аналогах. // Геология и Геофизика Юга России. – 2018. – Т. 8. №2. – С. 83-90. DOI 10.23671/VNC.2018.2.14358
3. Войтковский К. Ф. Механические свойства льда. – М.: АН СССР, 1960. – 142 с.
4. Ворович И. И., Бабешко В. А., Пряхина О. Д. Динамика массовых тел и резонансные явления в деформируемых средах. – М.: Научный мир, 1999. – 242 с.
5. Заалишвили В. Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. – М.: Наука, 2009. – 350 с.
6. Заалишвили В. Б., Харебов К. С. Процесс схода ледника Колка 20 сентября 2002 г (по инструментальным данным). // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. – Владикавказ: ЦГИ ВНИЦ РАН и РСО-А, 2014. – С. 141-173.
7. Завриев К. С., Назаров А. Г., Карцивадзе Г. Н. Основы теории сейсмостойкости зданий и сооружений. – М.: Издательство литературы по строительству, 1970. – 224 с.
8. Котляков В. М., Рототаева О. В., Носенко Г. А., Десинов Л. В., Осокин Н. И., Чернов Р. А. Кармадонская катастрофа: что случилось и чего ждать дальше. – М.: Издательский дом «Кодекс», 2014. – 184 с.
9. Кошляков Н. С., Глинер Э. Б., Смирнов М. М. Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Высшая школа, 1970. – 767 с.
10. Курбацкий Е. М., Косауров А. П. К вопросу о пересчете балльности в ускорения колебаний грунта. // Инженерные изыскания. – 2016. – № 14. – С. 50-60.
11. Музаев И. Д., Созанов В. Г. К проблеме возникновения гляциальных селей. // В сб.: Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. Коллективная монография. / Под ред. А. В. Николаева, В. Б. Заалишвили. – Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН, 2019. – 806 с.
12. Музаев И. Д., Харебов К. С., Музаев Н. И. Постановка и решение многослойной краевой задачи сейсмических колебаний высотного сооружения. // Сейсмостойкое строительство Безопасность сооружений. – 2014. – № 1. – С. 22-25.
13. Прочность. Устойчивость. Колебания. Справочник в трёх томах. Том 3. / Под общей ред. И. А. Биргера и Я. Г. Поновко. – М.: Машиностроение, 1968. – 567 с.
14. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. Перевод с английского. – М.: МИР, 1971. – 274 с.

15. Слепян Л. И. Нестационарные упругие волны. – Л.: Судостроение, 1972. – 37 с.
16. Сорокин Е. С. Динамический расчет несущих конструкций зданий. – М.: Госстройиздат, 1956. – 336 с.
17. Шульман С. Г. Расчёты сейсмостойкости гидросооружений с учётом влияния водной среды – М.: Энергия, 1976. – 336 с.
18. Шумский П. А. Основы структурного ледоведения. – М. – 1955. – 492 с.
19. Bonnet G., Heize J. E. Non linear seismic response of a soft layer. // 10<sup>th</sup> European conference on Earthquake Engineering. Duma (et). Blkema, Rotterdam. – 1995. – pp. 361-364.
20. Ewing M., Crary A. P and Thorne A. M. Propagation of elastic waves in ice. *Physics*, v. 5, N 6, 1934, pp. 165-168
21. Glen J. W., Perutz M. F. The growth and deformation of ice crystals. // *J. Glaciology*. – 1954. – Vol. 2. No. 16. – pp. 397-403
22. Huang Jun-Yan, Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Chun-Hsiang Kuo, Kuo-Liang Wen, Chun-Te Chen. Progress of Soil Nonlinearity Researches of Recent Years in Russia and Taiwan. // *Geology and Geophysics of Russian South*. – 2020. – Vol. 10 (2). – pp. 95-112. DOI: 10.46698/VNC.2020.28.93.007.
23. Jellinek H., Brill R. Viscoelastic properties of ice. // *J. appl. Physics*. – 1956. – Vol. 27. No. 10. – pp. 1198-1209.
24. Yin-Min Wu, Ta Liang Teng, Tzay-Chyn Shin, Nai-Chi Hsiao. Relationship between PGA, Ground PGV and I (MM) in Taiwan. // *BSSA*. – 2003. – Vol. 93 (1). – pp. 386-396.

### References

1. Aptikaev F. F. New building codes: one step forward, two steps backward. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2020. Vol. 10. No. 2. pp. 71-81. DOI: 10.46698/VNC.2020.50.57.005. (In Russ.)
2. Berger M. G. On the inconsistency and groundlessness glaciological ideas about the catastrophic surge of Kolka glacier, its causes and analogues. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2018. Vol. 8. No. 2. pp. 83-90. DOI 10.23671/VNC.2018.2.14358 (In Russ.)
3. Voitkovskii K. F. Mechanical properties of ice. Moscow. ASUSSR, 1960. 142 p. (In Russ.)
4. Vorovich I. I., Babeshko V. A., Pryakhina O. D. Dynamics of mass bodies and resonance phenomena in deformable media. Moscow. Nauchnyi mir, 1999. 242 p. (In Russ.)
5. Zaalishvili V. B. Seismic microzonation of urban territories, settlements and large construction sites. Moscow. Nauka, 2009. 350 p. (In Russ.)
6. Zaalishvili V. B., Kharebov K. S. The process of the Kolka glacier collapse on September 20, 2002 (according to instrumental data). In: *Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow*. Vladikavkaz. CGI VSC RAS, 2014. pp. 141-173. (In Russ.)
7. Zavriev K. S., Nazarov A. G., Kartsivadze G. N. Foundations of the theory of seismic resistance of buildings and structures. Moscow. Publishing house of literature on construction, 1970. 224 p. (In Russ.)
8. Kotlyakov V. M., Rototaeva O. V., Nosenko G. A., Desinov L. V., Osokin N. I., Chernov R. A. Karmadon catastrophe: what happened and what to expect next. Moscow. Kodeks, 2014. 184 p. (In Russ.)

9. Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. Partial differential equations of mathematical physics. Moscow. Vysshaya shkola, 1970. 767 p. (In Russ.)
10. Kurbatskii E.M., Kosaurov A.P. On the question of recalculation of the intensity points in the acceleration of ground vibrations. Engineering survey, 2016. No. 14. pp. 50-60. (In Russ.)
11. Muzaev I.D., Sozanov V.G. On the problem of glacial mudflows. In: Proceedings Hazardous natural and man-made processes in mountainous regions: models, systems, technologies. Vladikavkaz. GPI VSC RAS, 2019. 806 p. (In Russ.)
12. Muzaev I.D., Kharebov K.S., Muzaev N.I. Formulation and solution of a multilayer boundary value problem of seismic vibrations of a high-rise structure. Earthquake engineering. Constructions safety, 2014. No. 1. pp. 22-25. (In Russ.)
13. Durability. Stability. Vibrations. Handbook in three volumes. Volume 3. Ed. I. A. Birger and Ya. G. Ponovko. Moscow. Mechanical Engineering, 1968. 567 p. (In Russ.)
14. Skuchik E. Simple and complex vibratory systems. Translation from English. Moscow. MIR, 1971. 274 p. (In Russ.)
15. Slepyan L.I. Nonstationary elastic waves. Leningrad. Sudostroenie, 1972. 37 p. (In Russ.)
16. Sorokin E.S. Dynamic analysis of load-bearing structures of buildings. Moscow. Gosstroyizdat, 1956. 336 p. (In Russ.)
17. Shulman S.G. Calculations of seismic resistance of hydraulic structures taking into account the influence of the aquatic environment. Moscow. Energy, 1976. 336 p. (In Russ.)
18. Shumskii P.A. Fundamentals of Structural Ice Science. Moscow, 1955. 492 p. (In Russ.)
19. Bonnet G., Heize J.E. Non linear seismic response of a soft layer. 10<sup>th</sup> European conference on Earthquake Engineering. Duma (et). Blkema, Rotterdam, 1995. pp. 361-364.
20. Ewing M., Crary A. P and Thorne A.M. Propagation of elastic waves in ice. Physics, 1934. Vol. 5. No. 6. pp. 165-168
21. Glen J.W., Perutz M.F. The growth and deformation of ice crystals. J. Glaciology, 1954. Vol. 2. No. 16. pp. 397-403
22. Huang Jyun-Yan, Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Chun-Hsiang Kuo, Kuo-Liang Wen, Chun-Te Chen. Progress of Soil Nonlinearity Researches of Recent Years in Russia and Taiwan. Geology and Geophysics of Russian South, 2020. Vol. 10 (2). pp. 95-112. DOI: 10.46698/VNC.2020.28.93.007.
23. Jellinek H., Brill R. Viscoelastic properties of ice. J. appl. Physics, 1956. Vol. 27. No. 10. pp. 1198-1209.
24. Yin-Min Wu, Ta Liang Teng, Tzay-Chyn Shin, Nai-Chi Hsiao. Relationship between PGA, Ground PGV and I (MM) in Taiwan. BSSA, 2003. Vol. 93 (1). pp. 386-396.

УДК: 550.34.013.4, 551.24

DOI: [10.46698/VNC.2021.52.15.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.52.15.007)

Оригинальная статья

## Сравнительная геодинамика и геотермия Альпийского и Тихоокеанского поясов. Механико-математическое моделирование

В. Б. Свалова 

Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, Россия, 101000, Москва, Уланский  
переулок, 13, к. 2, e-mail: v-svalova@mail.ru;

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук,  
Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а

Статья поступила: 29.07.2021, доработана: 24.08.2021, одобрена в печать: 07.09.2021

**Резюме:** Формирование и эволюция геологических структур отражают взаимодействие коры и мантии. **Актуальность работы** определяется предметом исследования – решением задачи механико-математического моделирования формирования и эволюции геологических структур над поднимающимся мантийным диапиром. Для моделирования геологических процессов и эволюции геологических структур в связи с движениями глубинных слоев мантии были собраны и проанализированы все возможные геолого-геофизические данные и использованы механико-математические модели различной реологии. Геолого-геофизические данные для Альборанского, Балеарского, Тирренского, Эгейского, Ионического, Черного, Каспийского морей, Левантийской, Прикаспийской, Паннонской, Алеутской впадин, Охотского, Японского, Филиппинского морей собраны и проанализированы. Взаимодействие литосферы и астеносферы находит свое отражение в формировании и эволюции геологических структур. Зоны столкновения литосферных плит характеризуются высокими Р-Т условиями, высокой сейсмичностью, землетрясениями, вулканизмом, магматизмом и активными проявлениями геотермальной энергии: вулканами, минеральными водами, дегазацией, горячими источниками. **Целью исследования** является разработка адекватной модели формирования и эволюции геологических структур на поверхности Земли в связи с глубинными геодинамическими процессами. **Методы работы.** Для изучения динамики литосферы в процессе эволюции на больших временах использовались механико-математические модели геологической среды на основе модели многослойной высоковязкой несжимаемой жидкости. Для приближенного решения уравнений Навье-Стокса и уравнения неразрывности использовались метод разложения по малому параметру, метод последовательных приближений и метод сращиваемых асимптотических разложений. Моделирование дает возможность рассчитывать распределение Р-Т параметров в слоях осадочного чехла, коры и верхней мантии в процессе эволюции структур. Существование зон растяжения в задуговых бассейнах можно объяснить подъемом мантийных диапиров в результате геотермального эффекта и подъемом астеносферы в процессе столкновения глубинных мантийных потоков. **Результаты работы.** Результаты механико-математического моделирования показывают, что в процессе развития осадочных бассейнов над поднимающимся мантийным диапиром структура поверхностного свода сменяется структурой глубокой депрессии. В аналитическом решении найдены критические параметры задачи, связывающие форму диапира, его глубину и скорость подъема со структурой земной поверхности. Результаты моделирования исследованы на примерах геологического строения Альпийского и Тихоокеанского поясов и хорошо согласуются с геолого-геофизическими данными.

**Ключевые слова:** геотермия, сейсмичность, геодинамика, моделирование, Альпийский пояс, Тихоокеанский пояс, сейсмоотография.

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №19-47-02010, "Natural hazards and monitoring for mountain territories in Russia and India") и темы НИР (№0142-2014-0027 «Развитие теории и методов изучения новейшей тектоники и современной геодинамики платформенных и орогенных территорий применительно к оценке их безопасности»).

**Для цитирования:** Свалова В. Б. Сравнительная геодинамика и геотермия Альпийского и Тихоокеанского поясов. Механико-математическое моделирование. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (3): 76 – 92. DOI: 10.46698/VNC.2021.52.15.007.

---

---

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

---

---

[DOI: 10.46698/VNC.2021.52.15.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.52.15.007)

Original paper

# Comparative geodynamics and geothermy of the Alpine and Pacific belts. Mechanical-mathematical modeling

V. B. Svalova 

Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the RAS, 13, building 2 Ulansky per.,  
Moscow 110100, Russian Federation, e-mail: v-svalova@mail.ru;

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 93a  
Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation

*Received: 29.07.2021, revised: 24.08.2021, accepted: 07.09.2021*

**Abstract.** The origin and evolution of geological structures reflect crust-mantle interaction. **The relevance of the work** is determined by the subject of the study – the solution of the problem of mechanical and mathematical modeling of the formation and evolution of geological structures above the rising mantle diapir. For simulation of geological processes and geological structures evolution in connection with deep mantle movements all possible geological-geophysical data were combined and analyzed and the mechanical-mathematical models of different rheology were used. Geological-geophysical data for Alboran sea, Balearic sea, Tyrrhenian sea, Aegean sea, Ionian sea, Levant sea, Black sea, Caspian sea, Pre-Caspian depression, Pannonian depression, Aleutian depression, Okhotsk sea, Sea of Japan, Philippines sea are combined and analyzed. Lithosphere-asthenosphere interaction is reflected in geological structures formation and evolution. The zones of the lithosphere plates collision are characterized by high P-T conditions, high seismicity, earthquakes, volcanism, magmatism and active geothermal energy manifestations: volcanoes, mineral waters, degazation, hot springs. **The aim** of the study is to develop an adequate model of the formation and evolution of geological structures on the Earth's surface in connection with deep geodynamic processes. **Methods.** To study the dynamics of the lithosphere in the process of evolution at long times, we used mechanical and mathematical models of the geological medium based on the model of a multilayer high-viscosity fluid. For the approximate solution of the Navier-Stokes equations and the continuity equation, the method of decomposition in a small parameter, the method of successive approximations and the method of splicing asymptotic decomposition were used. Modeling gives possibility to calculate P-T parameters distribution in the layers of sedimentary cover, crust and upper mantle in the process of the structures evolution. The existing of stretching zones in back-arc basins can be explained by upwelling of mantle diapirs as a result of geothermal effect and raising of asthenosphere in the process of collision of deep mantle flows. **Results.** The

results of mechanical and mathematical modeling show that during the development of sedimentary basins above the rising mantle diapir, the structure of the surface vault is replaced by the structure of a deep depression. In the analytical solution, the critical parameters of the problem are found that relate the shape of the diapir, its depth, and the ascent rate with the structure of the Earth's surface. The results of modeling are investigated on the examples of the Alpine and Pacific belts geological structures and give good agreement with geological-geophysical data.

**Keywords:** geothermy, seismicity, geodynamics, modeling, Alpine belt, Pacific belt, seismic tomography.

**Acknowledgments:** *This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation, (project No. 19-47-02010, "Natural hazards and monitoring for research in Russia and India") and research topics (No. 0142-2014-0027 "Development of the theory and methods of studying the latest tectonics and modern geodynamics of platform and orogenic territories in relation to the assessment of their safety").*

**For citation:** Svalova V.B. Comparative geodynamics and geothermy of the Alpine and Pacific belts. Mechanical-mathematical modeling. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2021. 11 (3): 76 – 92. DOI: 10.46698/VNC.2021.52.15.007.

## Введение

Формирование и эволюция геологических структур Альпийского и Тихоокеанского поясов во многом определяются подъемом мантийных диапиров, выражающих явление гравитационной неустойчивости в периоды тектоно-магматической активизации на фоне коллизии литосферных плит Африканской и Евразийской в Средиземноморье и Тихоокеанской и Евразийской в Тихоокеанском поясе.

Важным методом, применяемым при изучении геологических структур на разных этапах эволюции и анализе полей скоростей, напряжений и температур в осадочном чехле, коре и верхней мантии в различных тектонических условиях, является построение адекватной механико-математической модели геологической эволюции региона [Занемонец и др., 1974; Свалова, 2014, 2019, 2020; Condie, 2001; Davies, 1999; Trubitsyn et al., 2021].

Существуют два разных подхода к математическому моделированию геологических структур и процессов. Первый – применить полную систему механических уравнений, адекватно описывающих формирование и эволюцию той или иной тектонической структуры, и последующий расчет полученных уравнений при требуемых граничных и начальных условиях на мощных компьютерах.

Второй – максимально возможное упрощение полученной системы уравнений, позволяющее аналитически решить проблему с последующими полуколичественными выводами, сопоставимыми с имеющейся геолого-геофизической информацией. Каждый из подходов имеет свои преимущества и недостатки. Оптимальное решение геотектонических задач на основе механико-математического моделирования сочетает в себе преимущества каждого из вышеуказанных методов.

На основе моделирования удастся описать некоторые характерные особенности эволюции геологических структур над поднимающимся мантийным диапиром. Для такого анализа можно использовать механико-математические модели многослойной высоковязкой несжимаемой жидкости. Модели исследуются на основе геологического строения Альпийского и Тихоокеанского поясов.

## Геолого-геофизическое строение Альпийского и Тихоокеанского поясов

Альпийский пояс связан со столкновением континентальных плит (Аравийско-Африканской и Евразийской), а Тихоокеанский пояс связан со столкновением океа-

Таблица 1 / Table 1

**Геолого-геофизические данные для Альпийского и Тихоокеанского поясов /  
Geological-geophysical data for Alpine and Pacific belts**

Структуры / Structures	Толщина осадочного чехла (км) /	Толщина кристаллической коры (км) в депрессии (числитель) в окружении (знаменатель) /	Тепловой поток (мВт/м <sup>2</sup> ) /
1. Тирренское море / Tyrrhenian sea	6	16/45	30-160
2. Эгейское море / Aegean Sea	3	15/23	100
3. Черное море / Black Sea	16	15/45	30-35
4. Прикаспийская впадина / Caspian depression	24	12/40	40
5. Южно-Каспийская впадина / South Caspian depression	20	12/45	40-50
6. Ионическое море (юг) / Ionian Sea (South)	12	10/35	30-40
7. Ионическое море (север) / Ionian Sea (north)	8	10/30	50-70
8. Балеарское море / Balearic sea	8	10/40	50
9. Левантийская впадина / Levantine depression	6	8/30	30
10. Паннонская впадина / Pannonian depression	9	18/27	90
11. Алеутская впадина / Aleutian depression	5	10/26	60-80
12. Охотское море / Sea of Okhotsk	4	8/20	100
13. Японское море / Japanese Sea	2	12/29	100-120
14. Филиппинское море / Philippine sea	2	6/13	60

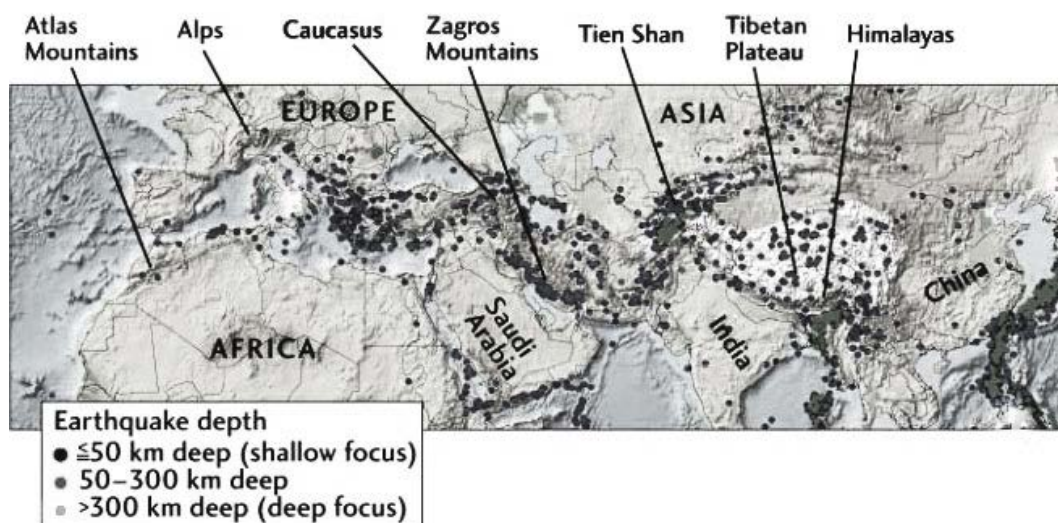


Рис. 1. Альпийско-Гималайский пояс (NASA) /  
Fig. 1. Alpine-Himalayan belt (NASA)



нической и континентальной плит (Тихоокеанской и Евразийской), но у них много общих черт [Богданов, 1988; Богданов, Филатова, 2001; Маловицкий и др., 1988; Родников и др., 2003; Хаин, 1985; Хаин, Ломизе, 2005]. Альпийский и Тихоокеанский пояса включают различные структуры – морские котловины, осадочные бассейны, задуговые бассейны, орогены (рис. 1-5) [Геофизические поля..., 1985; Милуков и др., 2015; Уломов и др., 2007; Моисеенко и др., 1993; Рогожин и др., 2015; Gee, Zeyen, 1996; Koulikov et al., 2012]. Моря и впадины характеризуются тонкой корой и в основном высокими тепловыми потоками (табл. 1) (The Global Heat Flow Database of the International Heat Flow Commission. <http://www.heatflow.und.edu/>) [Тектоника..., 1980; Земная кора..., 1982; Свалова, 2014; Фролова, 1997; Gornov, 2021]. Структуры характеризуются активным магматизмом и базальтовым вулканизмом с ксенолитами астеносферного вещества. Спрединговые зоны окраинных морей Тихоокеанского пояса проявляются отодвиганием от континентов островных дуг, приобретающих изгиб в сторону океана, что также объясняется подъемом мантийных диапиров. Скорость отодвигания составляет около 2 см/год [Картер, Робертсон, 1987] на фоне коллизии плит со скоростью около 7 см/год (рис. 4). Таким образом, геолого-геофизические данные позволяют связать эти структуры с апвеллингом мантийных диапиров [Андерсон, Дзевонский, 1984; Свалова, 2014; Karig, 1974; Ringwood et al., 1988; Rodnikov et al., 2001; Tamaki, 1988]. Над поднимающимися астеносферными диапирами на поверхности Земли возникают структуры сводовых поднятий или глубинных депрессий в зависимости от энергии и стадии подъема диапиров. Между диапирами возникают структуры орогенов и утолщение коры.

Развитие Альпийско-Гималайского пояса на всем своем протяжении сопровождалось проявлениями позднекайнозойского базальтового магматизма, выражающего явление тектоно-магматической активизации, а западный сектор структуры в

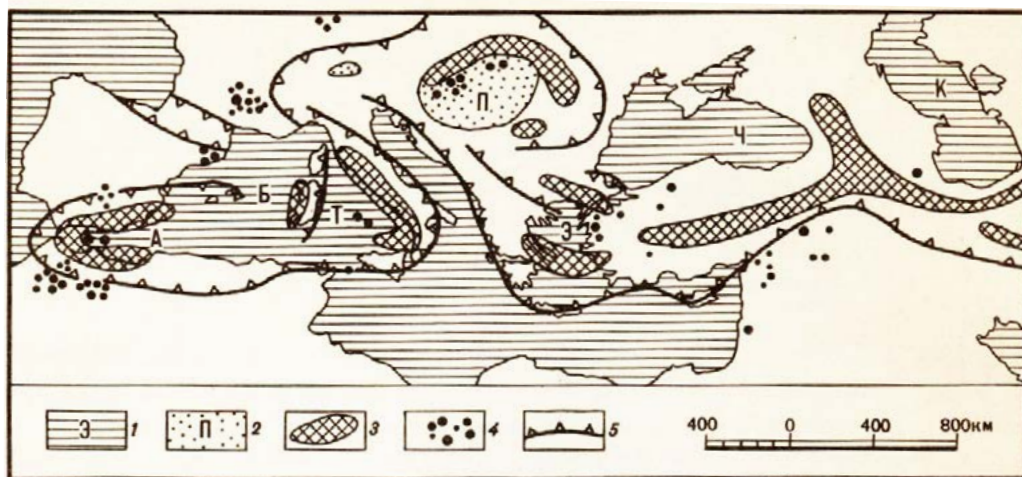


Рис. 2. Структура западной части Альпийско-Гималайского пояса. 1 – моря (А – Альборанское, Б – Балеарское, К – Каспийское, Т – Тирренское, Ч – Черное, Э – Эгейское); 2 – Паннонская впадина; 3 – вулканические дуги; 4 – ареалы базальтового вулканизма; 5 – фронтальные зоны крупнейших надвиговых структур [Шарков, Свалова, 1989] /

Fig. 2. Structure of Western sector of Alpine-Himalayan belt. 1 – seas (A – Alboran sea, B – Balearic sea, K – Caspian sea, T – Tyrrhenian sea, Ч – Black sea, Э – Aegean sea).

2 – Pannonian Depression. 3 – volcanic arcs. 4 – areals of basalt volcanism. 5 – frontal zones of napping structures [Sharkov, Svalova, 1989]

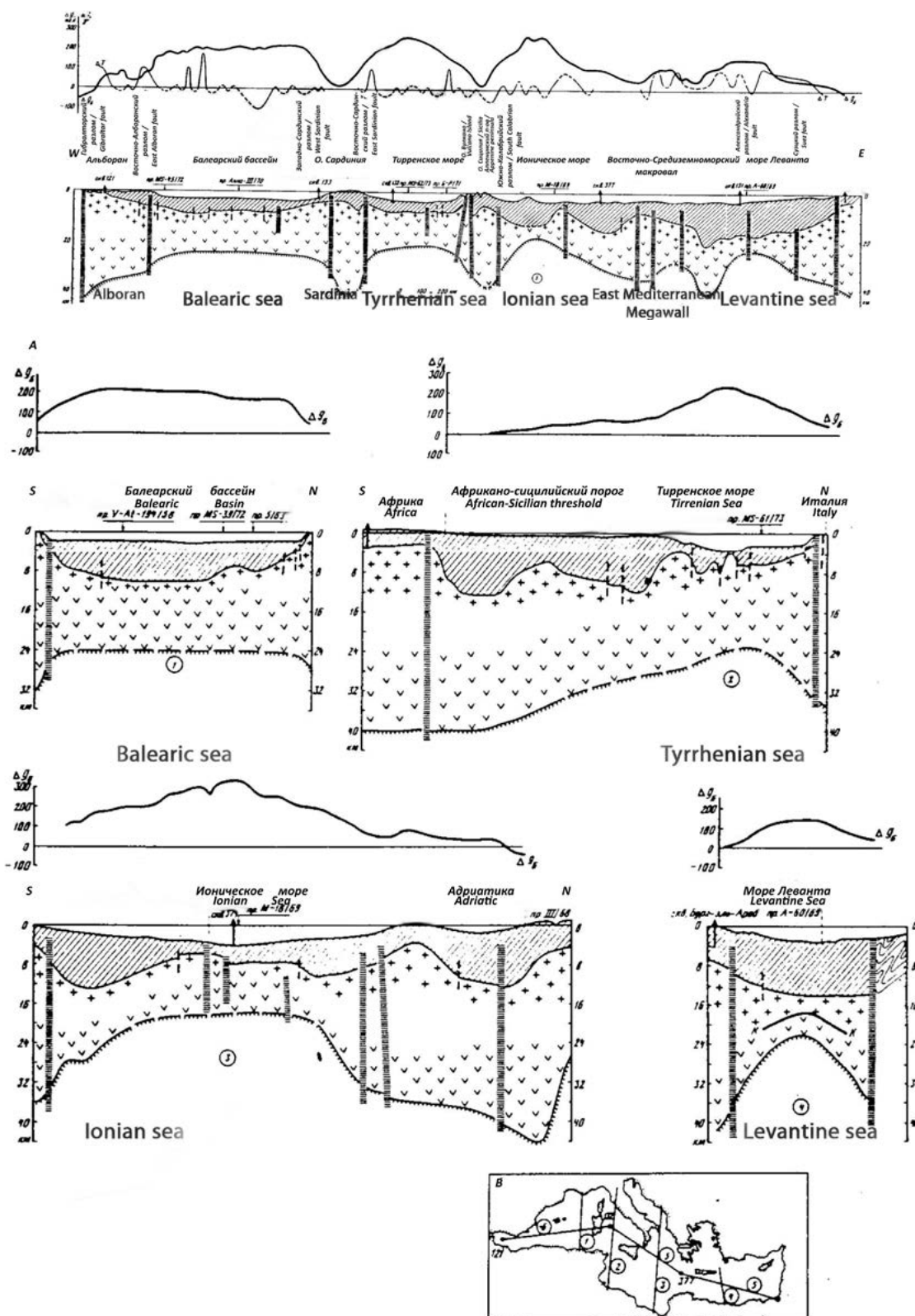


Рис. 3. Результаты геолого-геофизических исследований тектонических структур Средиземноморья [Сулиди-Кондратьев, Козлов, 1980] /

Fig. 3. Results of geological and geophysical studies of tectonic structures of the Mediterranean [Sulidi-Kondratyev, Kozlov, 1980]

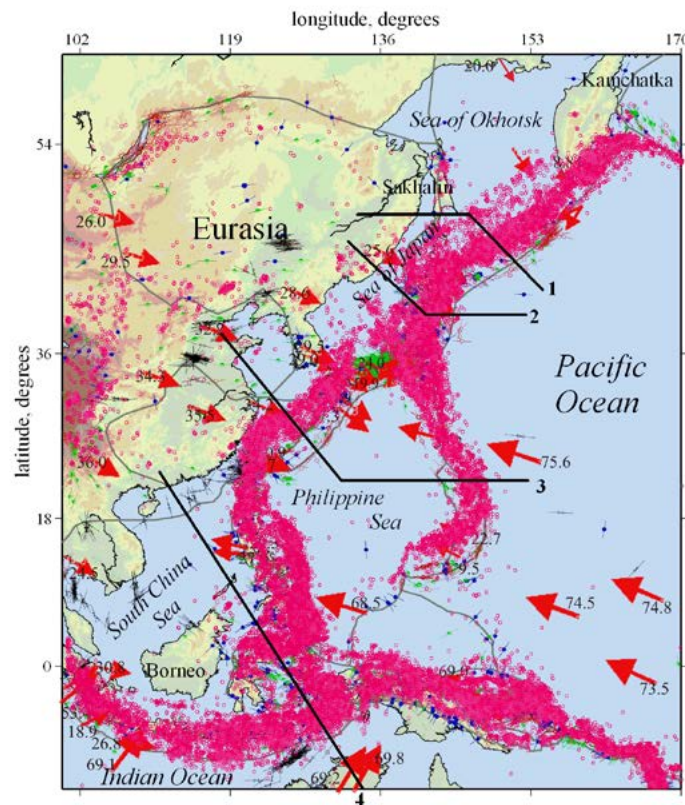


Рис. 4. Область переходной зоны от Евразийского континента к Тихому океану с пространственным распределением землетрясений с  $M \geq 3,5$  за период 1973-2011 гг. (розовые кружки) и профилями геотраверсов (1 – геотраверс Охотского моря; 2 – геотраверс Японского моря; 3 – геотраверс Северо-Китайской равнины – Филиппинское море; 4 – геотраверс Южно-Китайского моря). Красные стрелки и соседние числа указывают направление и скорость (мм/год) движения плит. Черные линии – границы плит [Zabarinskaya et al., 2021] /

Fig. 4. The region of the transition zone from the Eurasian continent to the Pacific Ocean with spatial distribution of earthquakes with  $M \geq 3.5$  for the period 1973-2011 (pink circles), and profiles of geotraverses (1 – Okhotsk Sea geotraverse; 2 – Japan Sea geotraverse; 3 – North China Plain-Philippine Sea geotraverse; 4 – South-China Sea geotraverse). Red arrows and adjacent numbers indicate the direction and velocity (mm/year) of plates movement. Black lines are plate boundaries [Zabarinskaya et al., 2021]

пределах Альпийского пояса характеризуется формированием и эволюцией задуговых бассейнов, которые развивались в определенной стадийности.

Представления о наличии мантийного диапира под субокеаническими впадинами подтверждаются геофизическими, геотермическими и петрологическими данными [Родников и др., 2003; Сулиди-Кондратьев, Козлов, 1980], которые, в частности, фиксируют наклон кровли мантии в сторону от котловины под углом  $12^\circ$  [Berry et al., 1969]. В субокеанических впадинах проявлены области преобразования коры посредством механизма рассеянного спрединга в отличие от линейного спрединга, свойственного срединно-океаническим хребтам и рифтам.

Геолого-геофизические данные свидетельствуют о формировании Альпийского пояса на фоне крупного астеносферного поднятия (суперплюма).

Явление гравитационной неустойчивости на поверхности суперплюма реализуется мантийными диапирами, являющимися структурами более мелкого масштаба. Смена режимов осадконакопления, а также изменение направления течения

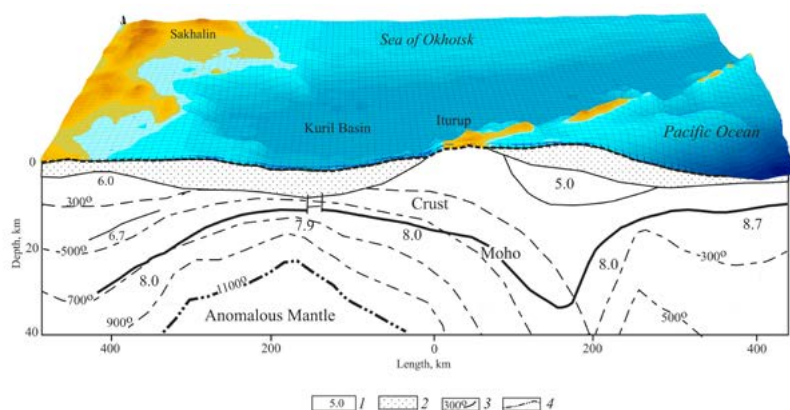


Рис. 5. Внутренняя температура Земли в коре и верхней мантии для Сахалина, Курильской котловины, Курильской островной дуги, Курильского жёлоба и западной части Тихого океана. 1 – сейсмические скорости, км/с; 2 – осадочный слой; 3 – изотермы, °С; 4 – изотерма 1100°С [Zabarinskaya et al., 2021] /

Fig. 5. Earth's internal temperature in the crust and upper mantle for Sakhalin, Kuril Basin, Kuril island arc, Kuril trench and west Pacific. 1 – seismic velocities, km/sec; 2 – sedimentary layer; 3 – isotherms, °C; 4 – isotherm of 1100°C [Zabarinskaya et al., 2021]

палеорек, подтверждает, что над мантийным диапиром сводовые поднятия могут сменяться глубокими депрессиями.

На базе анализа имеющихся геолого-геофизических данных разработана механико-математическая модель динамики литосферных движений над поднимающимся мантийным диапиром, хорошо описывающая механизм формирования отдельных геологических структур Альпийского и Тихоокеанского поясов.

Форма границ Мохо и Конрада глубоководных впадин типа Тирренского, Черного и Каспийского морей определяется динамикой астеносферных поднятий и физическими параметрами геологической среды.

Формирование осадочных бассейнов и задуговых морей Альпийского и Тихоокеанского поясов объясняются апвеллингом мантийных диапиров, а структура орогена Кавказа связана как с зоной коллизии литосферных плит, так и со столкновением потоков астеносферы под Черным и Каспийским морями.

#### Методы работы. Механико-математическое моделирование эволюции геологических структур над поднимающимися астеносферными диапирами

Интересно и важно проанализировать и объяснить происхождение и эволюцию геологических структур на основе построения адекватных механико-математических моделей. Некоторые характерные черты развития геологических структур Альпийского и Тихоокеанского поясов, в частности, областей задугового спрединга над региональными подъемами астеносферы, которые здесь являются центрами глубинной активности, в значительной мере определяющими все другие процессы, могут быть описаны моделью многослойной высоковязкой несжимаемой жидкости, плотности и вязкости которой меняются от слоя к слою. Для приближенного решения уравнений механики сплошных сред используются метод разложения по малому параметру, метод последовательных приближений и метод сращиваемых асимптотических разложений [Занемонец и др., 1974; Свалова, 2014].

Чтобы получить аппроксимацию системы механических уравнений путем анализа порядка соответствующих значений величин в этих уравнениях, необходимо выделить малые параметры задачи, которые можно использовать для разложения.

Многочисленные геологические структуры характеризуются довольно пологим залеганием слоев и значительным превышением горизонтального регионального масштаба  $L$  над вертикальным масштабом  $h$  типичной мощности геологических слоев. Это позволяет ввести в анализ задачи малый параметр  $h/L$ . Второй малый параметр задачи  $F/R$ ,  $F$  – число Фруда,  $R$  – число Рейнольдса, возникает при анализе реологического поведения вещества в слоях [Занемонец и др., 1974; Свалова, 2014].

Толщина литосферы Альпийского пояса изменяется от 30 км в центре депрессии Тирренского моря до 70-100 км во впадинах Восточного Средиземноморья. Характерный размер впадин по латерали достигает 500-1000 км и более, расстояние между впадинами порядка 1000-1500 км.

Тогда предлагается для описания динамики слоев коры и мантийной литосферы использовать двухслойную модель высоковязкой несжимаемой жидкости с характерными параметрами  $h_3 \sim 10$  км – толщина коры,  $h_2 \sim 100$  км – толщина мантийной литосферы,  $L \sim 1000$  км – горизонтальный масштаб геологических структур,  $\varepsilon = h_3/L = 10^{-2}$  – малый параметр задачи.

Медленные деформации литосферы моделируются с помощью модели вязкого течения в многослойной несжимаемой высоковязкой ньютоновской жидкости на основе уравнения Навье-Стокса (1) и уравнения неразрывности (2):

$$dv/dt = F - (1/r) \text{ grad } p + (\mu/r) \Delta v \quad (1)$$

$$\text{div } v = 0, \quad (2)$$

где  $v$  – вектор скорости,  $F$  – сила тяжести,  $p$  – давление,  $r$  – плотность,  $\mu$  – вязкость,  $t$  – время.

Введем безразмерные значения координат, скоростей и давления  $X, Y, Z, U, V, W, P$ :

$$x=LX, y=LY, z=hZ, u=u_0U, v=u_0V, w=u_0(h/L)W, p=r_0ghP, \quad (3)$$

где  $r_0, u_0$  – характерные значения плотности и скорости. Можно получить уравнение Навье-Стокса и уравнение неразрывности в безразмерной форме для медленных движений в тонком слое для двумерного случая:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial X} = \alpha \mu \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \\ \frac{\partial P}{\partial Z} = -\rho \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{F}{R \left(\frac{h}{L}\right)^3}, \quad F = \frac{u_0^2}{gL}, \quad R = \frac{u_0 L \rho_0}{\mu_0}, \quad (6)$$

где  $F$  – число Фруда,  $R$  – число Рейнольдса,  $\rho_0, \mu_0, u_0$  – характерные масштабы плотности, вязкости и скорости.

Силы на верхней границе равны 0 (свободная поверхность). Скорости и давления непрерывны на границах слоев. Тогда из уравнений (4-5) можно найти давления и скорости в слоях в зависимости от скорости вещества на нижней границе [Занемонец и др., 1974; Свалова, 2014].

Также на верхней границе  $\zeta^*$  выполняется кинематическое условие свободной поверхности, состоящее в том, что частицы не покидают поверхность в процессе движения (7):

$$S \frac{\partial \zeta^*}{\partial t} + U^* \frac{\partial \zeta^*}{\partial X} - W^* = 0 \quad (7)$$

$$S = \frac{L}{u_0 t_0}, \quad (8)$$

где  $S$  – число Струхала.  $t_0$  – масштаб времени.

Границу Мохо также можно рассматривать как вещественную и непроницаемую. Подставляя скорости в уравнение свободной поверхности (7), можно получить уравнение движения для любой непроницаемой границы.

Разлагая скорости и давления в ряд по  $\sqrt{\varepsilon}$ , можно получить в нулевом приближении уравнения дневной поверхности  $\zeta_3$  и поверхности фундамента  $\zeta_2$  в зависимости от скорости подъема мантийного диапира  $z_1 U_0, W_0|_{\zeta_1}$ :

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \zeta_3}{\partial X^2} = \beta \left[ h_2 \frac{\partial U_0}{\partial X} - W_0 \right] \\ \left[ S \frac{\partial \zeta_2}{\partial t} + U_0 \frac{\partial \zeta_2}{\partial X} + \alpha \left[ h_2 \frac{\partial U_0}{\partial X} - W_0 \right] \right] = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{(h_3)^3}{(h_3)^3 + \frac{\mu_3}{\mu_2} (h_2)^3}, \quad \beta = \frac{1}{\frac{\rho_3}{3} \left[ \frac{(h_3)^3}{\mu_3} + \frac{(h_2)^3}{\mu_2} \right]},$$

где  $S = \frac{L}{u_0 t_0}$  – число Струхала,  $u_0$  – характерный масштаб скорости вещества литосферы,  $t_0$  – характерное время процессов,  $\mu_i$  – вязкости слоев,  $\rho_i$  – плотности слоев.

Зададим поле скоростей и морфологию границы  $\zeta_1$  в виде:

$$U_0 = a \operatorname{th} kX, \quad \zeta_1(X, t) = -\gamma \operatorname{sh}^2 kX - (h_2 + h_3) + \frac{D}{S} t, \quad (10)$$

что хорошо отражает основные особенности глубинных движений: подъем астеносферного диапира, раздвиг вещества над ним и опускание вещества на достаточном удалении от центра.

Здесь  $k, a$  – параметры интенсивности раздвига:  $k$  – в центре структуры,  $a$  – вдали от центра;  $\gamma$  – параметр формы поднимающегося диапира;  $D$  – скорость подъема диапира  $D = S \frac{\partial \zeta_1}{\partial t}$  (рис. 6).

Решение системы (9-10) дает для больших  $t$ :

$$\begin{cases} \zeta_2 = -h_3 - \alpha \gamma \operatorname{sh}^2 kX + \alpha h_2 \ln(\operatorname{ch} kX) + \alpha (D - h_2 a k) \frac{t}{S} \\ \left\{ \zeta_3 = \beta \left[ \frac{h_2 a}{k} \ln(\operatorname{ch} kX) + \frac{\gamma a}{(2k)^2} \operatorname{ch} 2kX - \left( \frac{\gamma a + D}{2} \right) X^2 \right] + C_1(t), \right. \end{cases} \quad (11)$$

где  $C_1(t)$  – константа интегрирования. Можно считать  $C_1(t) = 0$ .

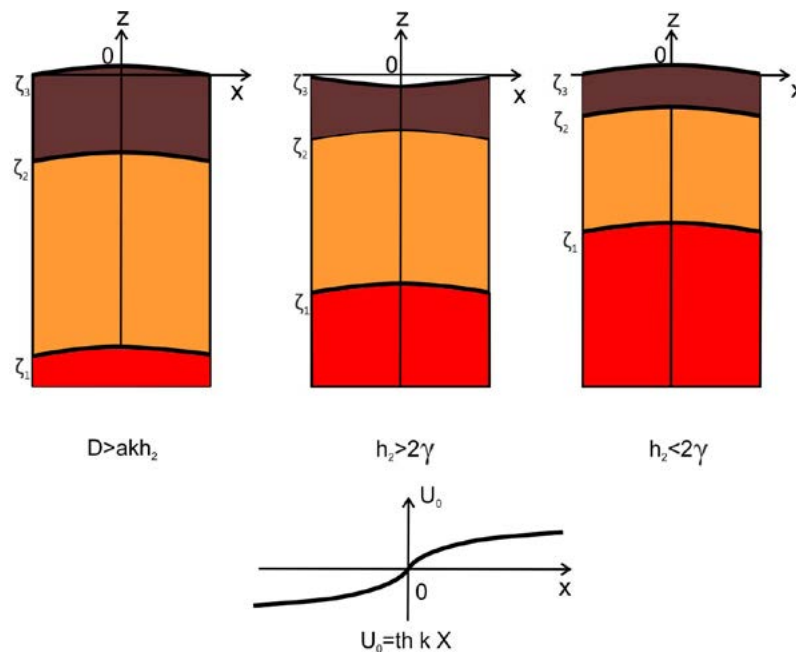


Рис. 6. Характерный разрез слоев земной коры и мантийной литосферы над поднимающимся астеносферным диапиром без латерального ограничения движения.  $U_0 = a th kX /$

Fig. 6. Characteristic section of layers of crust and mantle lithosphere above asthenosphere diaper upwelling without lateral restriction of movement.  $U_0 = a th kX$

Из анализа данных выражений можно получить критическую глубину подъема астеносферного диапира  $h_2 = 2g$ , когда изменяется характерная форма слоев литосферы. Если  $h_2 > 2g$ , то существует прогиб поверхности фундамента в центре раздвига. Если же  $h_2 < 2g$  (небольшая глубина плюма) или же скорость его подъема достаточно велика ( $D > h_2 ak$ ), то выпуклости поверхности астеносферного диапира соответствует сводовое поднятие поверхности фундамента (рис. 6).

Если на периферии бассейна существуют препятствия свободному раздвигу литосферы, то поле скоростей на нижней границе слоев можно задать в виде:

$$U_0 = \frac{th X}{ch^2 X}, \quad \zeta_1 = -sh^2 X - (h_2 + h_3) \quad (12)$$

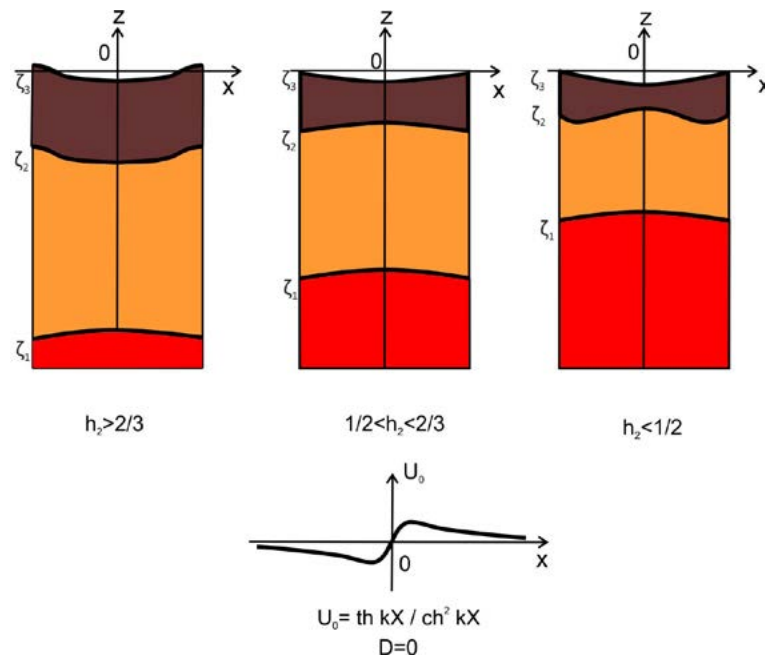
Здесь параметры интенсивности раздвига, изменения формы поднимающегося диапира и скорость подъема диапира опущены для упрощения анализа и наглядности решения задачи.

Тогда:

$$\left\{ \begin{array}{l} \zeta_3 = -\frac{\beta h_2}{2} \frac{1}{ch^2 X} + \frac{\beta}{2} X^2 - \beta \ln(ch X) + C(t) \\ \zeta_2 \cong -h_3 - \frac{\alpha h_2}{S} t - \alpha(1 - 2h_2) sh^2 X + \alpha(1 - 2h_2) (sh X)^{\frac{2(h_2-1)}{1-2h_2}} \exp\left[\frac{2-3h_2}{1-2h_2} \left(\frac{t}{S} - sh^2 X\right)\right] \end{array} \right. \quad (13)$$

где  $C(t)$  – постоянная интегрирования.

В этом случае существуют две критические глубины кровли астеносферного поднятия, когда разрез слоев качественно меняется. При  $h_2 > 2/3$  в центре структуры формируется прогиб. При  $1/2 < h_2 < 2/3$  поверхность фундамента выполаживается, а при  $h_2 < 1/2$  отражает морфологию диапира в центре раздвига и образует вогнутость фундамента на периферии депрессии (рис. 7).



*Рис. 7. Характерный разрез слоев земной коры и мантийной литосферы над поднимающимся астеносферным диапиром с латеральными ограничениями для раздвига /*

*Fig. 7. Characteristic section of layers of crust and mantle lithosphere above asthenosphere diapir upwelling with lateral restriction of movement*

Важно отметить, что аналогичные системы уравнений и подходы применимы к структурам разного масштаба – не только к формированию и эволюции осадочных бассейнов и задуговых морей, но и к океаническим впадинам и структурам континентов на разных этапах эволюции и развития. В каждом конкретном случае необходимо анализировать соотношение геометрических параметров задачи, слоистость геологической среды и реологию вещества слоев.

### Обсуждение результатов

Анализ построенных моделей и полученных решений значительно расширяет представление о механизмах формирования и эволюции геологических структур и позволяет делать новые выводы, которые не всегда легко объясняются геологами. Совместное использование моделирования и геолого-геофизических данных расширяет возможности метода механико-математического моделирования литосферных процессов и дает дополнительные надежные средства подтверждения гипотез и выводов геологов и геофизиков. Объяснение формирования геологических структур на поверхности Земли зависит от масштаба рассматриваемых процессов, а механико-математическое моделирование имеет свои ограничения вследствие детальности и масштаба объекта моделирования. Если рассматривать Земной шар в целом и моделировать процессы в ядре, мантии, консолидированной коре и осадочном чехле, то очень трудно одновременно уловить детали формирования структур и их движущие процессы. Поэтому часто моделирование литосферных процессов выделяется в отдельную задачу, а процессы в астеносфере и нижней мантии служат граничными условиями для решения поверхностных задач. Также важно, что литосферные процессы развиваются на сферической поверхности Земли, и тектоника литосферных плит во многом определяется не только глубинными процессами в



мантии, раздвигающими плиты, но и латеральными ограничениями, когда плиты сталкиваются и формируют сложную систему геологических структур, определяющих зону коллизии литосферных плит. Так Средиземное море открывалось и закрывалось неоднократно вследствие тектоно-магматической активизации, подъема крупномасштабного мантийного плюма и раздвига плит над ним, а затем, после исчерпания энергии плюма, закрытия океана Тетис и сближения и коллизии литосферных плит в Альпийско-Гималайском поясе. Явление гравитационной неустойчивости на поверхности глобального мантийного плюма проявляется в виде подъема отдельных мантийных диапиров более мелкого масштаба, ответственных за формирование морских впадин западного сектора Альпийско-Гималайского пояса. Эти впадины характеризуются последовательностью и стадийностью развития, и можно последить, как энергия поднимающегося плюма концентрируется в отдельных впадинах и мигрирует от периферии к центру, где максимум активизации реализуется в Эгейском море. А Корсика и Сардиния отодвигаются от Апеннин вследствие подъема диапира под Тирренским морем.

В Эгейском море в районе вулкана Санторин расположена самая крупная в Средиземном море положительная гравитационная аномалия, что говорит о близости к поверхности расплавленной более легкой астеносферы. Также важным показателем активности процессов на дне Эгейского моря являются постоянно происходящие там землетрясения. Анализ эпицентров землетрясений свидетельствует об особенно высокой сейсмической активности зоны, проходящей через Пелопоннесский полуостров и острова Крит и Родос, где неоднократно отмечались землетрясения силой 9 баллов. Это хорошо объясняется наличием здесь зоны субдукции [Шарков, Свалова, 1989].

Также важно отметить, что в Тихоокеанском поясе на фоне коллизии литосферных плит происходит отодвигание островных дуг от центра депрессий окраинных морей, а общая тенденция развития региона такова, что границы Тихого океана сближаются на фоне раздвига срединно-океанического хребта в Тихом океане [Хаин, 1985]. Этот факт отмечает и чл.-корр. РАН В. П. Трубицын («Атлантика раздвигает плечи, а Тихий океан потихоньку закрывается». «Московский комсомолец», 3.2.2021). Здесь важно, какой из океанов – Атлантический или Тихий – интенсивнее раскрывается и как воздействует на окружающие континентальные плиты на данном этапе эволюции Земли.

Все эти процессы тесно связаны и достаточно сложны, тем больший интерес и важность приобретают отдельные достижения и возможности по объяснению различных черт и эффектов при формировании и эволюции геологических структур.

## Выводы

Выводы механико-математического моделирования о смене режима подъема литосферы режимом формирования депрессии над поднимающимся мантийным диапиром при однонаправленности такого подъема хорошо объясняют некоторые геологические факты, которые фиксируются геологами и вызывают построение различных гипотез. Когда и по какой причине формируется осадочный бассейн, а когда сводовое поднятие или ороген, во многом объясняется механическим поведением вещества литосферы и астеносферы в сложных условиях напряженно-деформированного состояния среды зон коллизии литосферных плит. Механико-математическое моделирование является мощным фактором анализа, изучения и решения

многих геологических проблем. Именно механические движения являются базисом для тепловых и петрологических процессов. Механические процессы служат основой для конвективного переноса тепла в слоях Земли, на которые накладываются геохимические и петрологические процессы преобразования вещества. Основные черты формирования и эволюции геологических структур в нулевом приближении часто объясняются именно механическим поведением вещества литосферы и астеносферы.

Найдены критические параметры задачи, позволяющие определить эти процессы на количественном уровне. Полученные решения достаточно естественны и хорошо объясняют поведение литосферы при тектономагматической активизации. Действительно, сводовое поднятие на поверхности Земли образуется, если астеносферный диапир поднялся близко к поверхности. Или же если глубокий диапир обладает высокой энергией и скоростью подъема, что дает сильный импульс подъему литосферы и она не успевает растечься в стороны от центра активизации. Если же на поверхности образуется депрессия, то это может объясняться тем, что подъем диапира происходил медленно и долго с больших глубин, и литосфера успевает растечься над ним посредством механизма рассеянного спрединга. Процесс зависит от реологии слоев и соотношения между физическими параметрами. Выбор модели определяется детальностью исследований и тектонической расслоенностью литосферы – какие именно слои рассматривать и моделировать.

Таким образом, полученные из решения задач механико-математического моделирования выводы хорошо согласуются с имеющимися геолого-геофизическими данными о формировании и эволюции геологических структур и дают возможность достоверного объяснения многих наблюдаемых процессов и явлений.

## Литература

1. Андерсон Д.Л., Дзевонский А.М. Сейсмическая томография. // В мире науки. – 1984. – №12. – С. 16-26.
2. Богданов Н.А. Тектоника глубоководных впадин окраинных морей. – М.: Недра, 1988. – 219 с.
3. Богданов Н., Филатова Н. Строение и геодинамика формирования активных окраин континентов. // Литосфера. – 2001. – №1. – С. 32-49.
4. Геофизические поля и строение земной коры Закавказья. / Отв. ред. Белоусов В.В., Балавадзе Б.К. – М.: Наука, 1985. – 174 с.
5. Занемонец В.Б., Котелкин В.Д., Мясников В.П. О динамике литосферных движений. // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1974. – №4 – С. 43-54.
6. Земная кора и история развития Средиземного моря. / Отв. ред. Муратов М.В. – М.: Наука, 1982. – 208 с.
7. Картер У.Е., Робертсон Д.С. Исследование Земли с помощью интерферометрии со свехдлинной базой. // В мире науки. – 1987. – №1. – С. 16-25.
8. Маловицкий Я.П., Сенин Б.В. Пелагогенные впадины на современных и древних континентальных окраинах. // Геотектоника. – 1988. – №1. – С. 11-23.
9. Милюков В.К., Миронов А.П., Рогожин Е.А., Стеблов Г.М. Оценки скоростей современных движений Северного Кавказа по GPS наблюдениям. // Геотектоника. – 2015. – №3. – С. 56-65.
10. Моисеенко У.И., Негров О.Б. Геотермические условия Северо-Кавказской сейсмоопасной зоны. // В кн.: Геотермия сейсмичных и асейсмичных зон. – М.: Наука, 1993. – С. 32-40.

11. Рогожин Е. А., Горбатилов А. В., Степанова М. Ю., Овсяченко А. Н., Андреева Н. В., Харазова Ю. В. Структура и современная геодинамика мегантиклинория Большого Кавказа в свете новых данных о глубинном строении. // *Геотектоника*. – 2015. – № 2. – С. 36-49.
12. Родников А. Г., Сергеева Н. А., Забаринская Л. П., Родкин М. В. Особенности строения литосферы осадочных бассейнов окраинных и внутренних морей. // *Геофизика XXI столетия: 2002 год*. – М.: Научный Мир, 2003. – С. 125-135.
13. Свалова В. Б. Механико-математическое моделирование формирования и эволюции геологических структур в связи с глубинным мантийным диапиризмом. // *Мониторинг. Наука и технологии*. – 2014. – № 3 (20). – С. 38-42.
14. Свалова В. Б. Геотермия и сейсмичность Кавказского региона и обратная задача геодинамики. // *Геология и Геофизика Юга России*. – 2019. – Т. 9. № 3. – С. 77-93. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36485
15. Свалова В. Б. Геодинамика и геотермия Прикаспийской впадины и восточного сегмента Кавказского региона. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2020. – Т. 10. № 4. – С. 52-69. DOI: 10.46698/VNC.2020.92.72.004.
16. Сулиди-Кондратьев Е. Д., Козлов В. В. Деструкция земной коры в зоне сочленения Африкано-Аравийского континента и Средиземноморско-складчатого пояса. // В кн.: *Тектоника Средиземноморского пояса*. / Отв. ред. Муратов М. В., Яншин А. Л. – М.: Наука, 1980. – С. 40-49.
17. *Тектоника Средиземноморского пояса*. / Отв. ред. Муратов М. В., Яншин А. Л. – М.: Наука, 1980. – 244 с.
18. Уломов В. И., Данилова Т. И., Медведева Н. С., Полякова Т. П., Шумилина Л. С. К оценке сейсмической опасности на Северном Кавказе. // *Физика земли*. – 2007. – № 7. – С. 31-45.
19. Фролова Т. И. Магматизм и происхождение тафrogenных впадин. // *Проблемы эволюции тектоносферы. Сб. научных статей (к 90-летию со дня рождения В. В. Белоусова)*. / Отв. ред. Шолпо В. Н. – М.: ОИФЗ РАН 1997. – С. 298-317.
20. Хаин В. Е. Региональная геотектоника: Океаны. Синтез. – М.: Недра, 1985. – 512 с.
21. Хаин В. Е., Ломизе М. Г. Геотектоника с основами геодинамики. – М.: КДУ, 2005. – 560 с.
22. Шарков Е. В., Свалова В. Б. Внутриконтинентальные моря как результат задугового спрединга при коллизии континентальных плит. // *Доклады Академии наук СССР*. – 1989. – Т. 308. № 3. – С. 685-688.
23. Berry M. J., Knopoff L., Mueller St. The low-velocity channel of the Upper Basin. // *Rapp. et proc.-verb. reun. Comm. intern. explor. Sci. Mer. Mediterr.* – 1969. – Vol. 19. No. 4.
24. Condie K. C. Mantle plumes and their record in Earth history. // *Cambridge University Press*. – 2001. – 306 pp.
25. Davies G. F. Dynamic Earth. Plates, Plums and Mantle Convection. // *Cambridge University Press*. – 1999. – 458 pp.
26. Gee D. G., Zeyen H. J. EUROPROBE 1996 – Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents. // *Uppsala University*. – 1996. – 138 pp.
27. Gornov P. Geothermy of the continental margins of Eastern Russia. // In the collection: *Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. Series: "Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering"*. / Ed. Svalova V. B. Springer, Switzerland. – 2021. – pp. 123-137.
28. Karig D. S. Evolution of arc systems in the Western Pacific. // *An. Rev. Earth and Planet. Sci.* – 1974. – Vol. 2. – pp. 51-75.
29. Koulakov I., Zabelina I., Amanatashvili I., Meskhia V. Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography. // *Solid Earth*. – 2012. – No. 3. – pp. 327-337.
30. Ringwood A. E., Irifune T. Nature of 650 km seismic discontinuity: implication for mantle dynamics and differentiation. // *Nature*. – 1988. – Vol. 331. No. 6152. – pp. 131-134.

31. Rodnikov A. G., Sergeyeva N. A., and Zabarinskaya L. P. Deep structure of the Eurasia-Pacific transition zone. // Russian Journal of Earth Sciences. – 2001. – Vol. 3. No. 4. – pp. 293-310.
32. Tamaki K. Geological structure of the Sea of Japan and its tectonic implications. // Bull. Geol. Surv. Japan. – 1988. – Vol. 39. No. 3. – pp. 269-365.
33. Trubitsyn V.P., Trubitsyn A.P., Evseev M.N., Evseev A.N. The processes of heat and mass transfer in the Earth's mantle. // In the collection: Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. Series: «Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering». / Ed. Svalova V.B. Springer, Switzerland. – 2021. – pp. 3-23.
34. Zabarinskaya L., Sergeyeva N., Rashidov V., Nisilevich M., Krylova T. Structure and Dynamics of the Lithosphere for the Eurasia-Pacific Transition Zone. // In the collection: Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. Series: “Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering”. / Ed. Svalova V.B. Springer, Switzerland. – 2021. – pp. 411-428.

## References

1. Anderson D. L., Dzevonsky A. M. Seismic tomography. In the world of science, 1984. No. 12. pp. 16-26. (In Russ.)
2. Bogdanov N.A. Tectonics of deep-sea troughs of the marginal seas. Moscow. Nedra, 1988. 219 p. (In Russ.)
3. Bogdanov N., Filatova N. Structure and geodynamics of active continental margins formation. Lithosphere, 2001. No. 1. pp. 32-49. (In Russ.)
4. Belousov V. V., Balavadze B. K. (ed.) Geophysical fields and the structure of the Earth's crust in Transcaucasia. Moscow. Nauka, 1985. 174 p. (In Russ.)
5. Zanemonets V.B., Kotelkin V.D., Myasnikov V.P. On the dynamics of the lithospheric motions. Izv. Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Earth, 1974. No. 4. pp. 43-54. (In Russ.)
6. Muratov M.V. (ed.) Earth's crust and the history of the Mediterranean Sea evolution. Moscow. Nauka, 1982. 208 p. (In Russ.)
7. Carter U.E., Robertson D. S. Earth exploration using very long baseline interferometry. In the world of science. 1987. No. 1. pp. 16-25. (In Russ.)
8. Malovitsky Ya. P., Senin B. V. Pelagogenic depressions on modern and ancient continental margins. Geotectonics. 1988. No. 1. pp. 11-23. (In Russ.)
9. Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblou G.M. Velocities of contemporary movements of the Northern Caucasus estimated from GPS observations. Geotectonics. 2015. No. 3. pp. 56-65. (In Russ.)
10. Moiseenko U.I., Negrov O.B. Geothermal conditions of the North Caucasus seismic hazard zone. In the book: Geothermy of seismic and aseismic zones. Moscow. Nauka, 1993. pp. 32-40. (In Russ.)
11. Rogozhin E.A., Gorbaticov A. V., Stepanova M. Yu., Ovsiuchenko A. N., Andreeva N. V., Kharazova Yu. V. The structure and modern geodynamics of the meganticlinorium of the Greater Caucasus in the light of new data on the deep structure. Geotectonics. 2015. No. 2. pp. 36-49. (In Russ.)
12. Rodnikov A.G., Sergeeva N.A., Zabarinskaya L.P., Rodkin M.V. Features of the lithosphere structure of sedimentary basins of marginal and closed seas. Geophysics of the XXI century, 2002. Moscow. Scientific World, 2003. pp. 125-135. (In Russ.)
13. Svalova V.B. Mechano-mathematical modeling of the formation and evolution of geological structures in connection with deep mantle diapirism. Monitoring. Science and technology. 2014. No. 3. Vol. 20. pp. 38-42. (In Russ.)
14. Svalova V.B. Geothermics and seismicity of the Caucasus region and inverse problem of geodynamics. Geology of the South of Russia, 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 77-93. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36485 (in Russ.)

15. Svalova V.B. Geodynamics and geothermics of Pre-Caspian Depression and eastern segment of Caucasus region. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 52-69. DOI: 10.46698/VNC.2020.92.72.004. (in Russ.)
16. Sulidi-Kondratyev E.D., Kozlov V.V. Earth's crustdestruction in the conjunction zone of the African-Arabian continent and the Mediterranean-fold belt. In the book: *Tectonics of the Mediterranean Belt*. Moscow. Nauka, 1980. pp. 40-49. (In Russ.)
17. Muratov M. V., Yanshin A. L. (ed.) *Tectonics of the Mediterranean Belt*. Moscow. Nauka, 1980. 244 p. (In Russ.)
18. Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Polyakova T.P., Shumilina L.S. To the assessment of seismic hazard in the North Caucasus. *Physics of the Earth*, 2007. No. 7. pp. 31-45. (In Russ.)
19. Frolova T.I. Magmatism and the origin of taphrogenic depressions. In: *Proceedings Problems of the evolution of the tectonosphere (to the 90<sup>th</sup> anniversary of the birth of V. V. Belousov)*. Moscow. OIFZ RAS, 1997. pp. 298-317. (In Russ.)
20. Khain V.E. *Regional geotectonics: Oceans. Synthesis*. Moscow. Nedra, 1985. 512 p. (In Russ.)
21. Khain V.E., Lomize M.G. *Geotectonics with the basics of geodynamics*. M. KDU, 2005. 560 p. (In Russ.)
22. Sharkov E.V., Svalova V.B. Intracontinental seas as a result of back-arc spreading during the collision of continental plates. *Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1989. Vol. 308. No. 3. pp. 685-688. (In Russ.)
23. Berry M.J., Knopoff L., Mueller St. The low-velocity channel of the Upper Basin. *Rapp. et proc.-verb. reun. Comm. intern. explor. Sci. Mer. Mediterr.*, 1969. Vol. 19. No. 4.
24. Condie K.C. *Mantle plumes and their record in Earth history*. Cambridge University Press, 2001. 306 pp.
25. Davies G.F. *Dynamic Earth. Plates, Plums and Mantle Convection*. Cambridge University Press, 1999. 458 pp.
26. Gee D.G., Zeyen H.J. *EUROPROBE 1996 – Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents*. Uppsala University, 1996. 138 pp.
27. Gornov P. Geothermy of the continental margins of Eastern Russia. In the collection: *Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. Series: "Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering"*. Ed. Svalova V.B. Springer, Switzerland. 2021. pp. 123-137.
28. Karig D.S. Evolution of arc systems in the Western Pacific. *An. Rev. Earth and Planet. Sci.*, 1974. Vol. 2. pp. 51-75.
29. Koulakov I., Zabelina I., Amanatashvili I., Meskhia V. Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography. *Solid Earth*. 2012. No. 3. pp. 327-337.
30. Ringwood A. E., Irifune T. Nature of 650 km seismic discontinuity: implication for mantle dynamics and differentiation. *Nature*, 1988. Vol. 331. No. 6152. pp. 131-134.
31. Rodnikov A. G., Sergeyeva N. A., and Zabarinskaya L. P. Deep structure of the Eurasia-Pacific transition zone. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2001. Vol. 3. No. 4. pp. 293-310.
32. Tamaki K. Geological structure of the Sea of Japan and its tectonic implications. *Bull. Geol. Surv. Japan.*, 1988. Vol. 39. No. 3. pp. 269-365.
33. Trubitsyn V.P., Trubitsyn A.P., Evseev M.N., Evseev A.N. The processes of heat and mass transfer in the Earth's mantle. In the collection: *Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. Series: "Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering"*. Ed. Svalova V.B. Springer, Switzerland. 2021. pp. 3-23.
34. Zabarinskaya L., Sergeyeva N., Rashidov V., Nisilevich M., Krylova T. Structure and Dynamics of the Lithosphere for the Eurasia-Pacific Transition Zone. In the collection: *Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. Series: "Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering"*. Ed. Svalova V.B. Springer, Switzerland. 2021. pp. 411-428.

УДК 551.24 (234.9)

DOI: [10.46698/VNC.2021.54.85.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.54.85.008)

Оригинальная статья

## О начальной скорости движения ледово-каменного материала, ударной воздушной волне, характере несущей среды и дальности действия взрывоподобного внезапного газодинамического выброса ледника Колка

М. Г. Бергер 

Геофизический институт – филиал ФГБУН ФНЦ «Владикавказский научный центр Российской академии наук», Россия, РСО-Алания, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: [berger7@rambler.ru](mailto:berger7@rambler.ru)

Статья поступила: 10.06.2021, доработана: 21.07.2021, принята к публикации: 04.08.2021

**Резюме: Актуальность работы.** Начальная массовая скорость компактного движения выброшенного ледово-каменного материала ледника Колка, достигнутая на стадии газового ускорения в эпицентральной зоне взрывоподобного внезапного газодинамического выброса ледника, составляла около 300 м/с. Именно столь высокие значения величины начальной массовой скорости выброса основного количества ледово-каменного материала определили возможность образования сопутствовавшей выбросу ударной воздушной волны, которая и на большом расстоянии от эпицентра выброса (порядка 15 км) все еще имела значительную интенсивность. Воздушным был характер несущей среды для всего Геналдонского лавинообразного потока в пределах выделенной прежде всего по этому признаку зоны транзита на всем многокилометровом ее протяжении, а для начальной и основной стадий выброса – и за пределами этой зоны (до Скалистого хребта). Дальность же действия взрывоподобного внезапного газодинамического выброса ледника Колка 20 сентября 2002 года, безусловно, не ограничивалась лишь вместительностью ледника Колка или Колкинским цирком, как иногда полагают, а захватывала огромную территорию Колкинского и Геналдонского ущелий и была ограничена (да и то не полностью) лишь непреодолимой механической преградой Скалистого хребта. **Цель работы.** В плане сопоставления с взрывоподобными направленными газодинамическими выбросами ледников рассматривается вопрос об истории изучения направленных вулканических взрывов, установленных полстолетием ранее. **Методы работы.** Проведен анализ имеющихся данных и существующих подходов их оценок. **Результаты работы.** Показана огромная мощность взрывоподобных направленных газодинамических выбросов ледника Колка, вполне сопоставимых в данном отношении с крупными направленными вулканическими взрывами.

**Ключевые слова:** ледник Колка, газодинамический выброс, начальная скорость, ударная воздушная волна, несущая среда, дальность действия газодинамического выброса, Колкинская катастрофа, направленные вулканические взрывы.

**Для цитирования:** Бергер М. Г. О начальной скорости движения ледово-каменного материала, ударной воздушной волне, характере несущей среды и дальности действия взрывоподобного внезапного газодинамического выброса ледника Колка. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (3): 93 – 102. DOI: [10.46698/VNC.2021.54.85.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.54.85.008).

DOI: [10.46698/VNC.2021.54.85.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.54.85.008)

Original paper

## On the initial velocity of the glacial-stone material movement, the air-blast, the nature of the carrier medium and the range of action of sudden explosion-like gas-dynamic surge of the Kolka glacier

M. G. Berger 

Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: berger7@rambler.ru

Received: 10.06.2021, revised: 21.07.2021, accepted: 04.08.2021

**Abstract: Relevance.** The initial mass velocity of the compact movement of the ejected glacial-stone material of the Kolka glacier, reached at the stage of gas acceleration in the epicentral zone of the sudden explosion-like gas-dynamic surge of the glacier, was about 300 m/s. Exactly such high values of the initial mass velocity of the surge of the main amount of glacial-stone material that determined the possibility of the formation of an accompanying ejection of the air-blast, which had a significant intensity even at a great distance from the surge epicenter (about 15 km). The nature of the carrier medium for the entire Genaldon avalanche flow was aerial within the transit zone distinguished primarily according this character along its entire length of many kilometers; and for the initial and main stages of the surge the nature was the same outside this zone (up to the Skalisty (Rocky) Ridge). The range of action of the sudden explosion-like gas-dynamic surge of the Kolka glacier on September 20, 2002, was certainly not limited only by the reservoir of the Kolka glacier or the Kolka cirque, as it is sometimes supposed, but captured the vast territory of the Kolka and Genaldon gorges and was limited (and even then not completely) only by the insurmountable mechanical barrier of the Skalisty (Rocky Ridge). **Aim.** In terms of the comparison with explosion-like directional gas-dynamic surges of glaciers, the article considers an issue of the history of study of directional volcanic explosions determined half a century earlier. **Methods.** The analysis of the available data and the existing approaches for their assessments was carried out. **Results.** The results of the work show the enormous power of explosion-like directed gas-dynamic surges of the Kolka glacier, which are quite comparable in this respect with large directed volcanic explosions.

**Keywords:** Kolka glacier, gas-dynamic surge, initial velocity, air-blast, carrier medium, range of action of gas-dynamic surge, Kolka catastrophe, directional volcanic explosions.

**For citation:** Berger M. G. On the initial velocity of the glacial-stone material movement, the air-blast, the nature of the carrier medium and the range of action of sudden explosion-like gas-dynamic surge of the Kolka glacier. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (3): 93 – 102. DOI: 10.46698/VNC.2021.54.85.008.

На леднике Колка мы сталкиваемся ... с особым типом движения... Значительную сложность представляет вопрос о необычно высоких скоростях движения льда.

*К. П. Роттаев, В. Г. Ходаков, А. Н. Кренке*

Физическая суть механизма породных выбросов представляется как спонтанный взрыв породы.

*П. Я. Галушко*

Взрывы на выброс и взрывы на сброс ... можно назвать направленными, или кумулятивными, поскольку действие взрыва наиболее ярко выражено в определенных направлениях.

*Л. К. Белопухов*

## Введение

М. Ю. Никитин с соавторами [2007], по данным непосредственных полевых наблюдений и дистанционных исследований, определяют характер прегражденного Скалистым хребтом движения начальной фазы Геналдонского потока как «воздушный наброс». Именно таким – *воздушным* – был характер несущей среды для начальной, а в значительной мере и для основной фазы взрывоподобного внезапного газодинамического выброса ледника Колка.

С этим связана и огромная максимальная величина начальной скорости этого выброса, а также ударная воздушная волна, барический эффект которой ощущали, в частности, жители селения Нижнее Кани [Кусов, 2006, с. 359], расположенного примерно в 15 км от находившегося в тыльной части ледника Колка эпицентра выброса.

Собственно говоря, именно воздушным сохранялся характер несущей среды для всего Геналдонского лавинообразного потока в пределах выделенной прежде всего именно по этому признаку [Черноморец, 2005; и др.] зоны транзита на всем многокилометровом ее протяжении. И лишь после Кармадонских ворот, в Геналдонском каньоне и за ним, движение выброшенного материала, в соединении с текущей водой Геналдона, а затем и Гизельдона, приняло селевой характер, но первые километры пути это был не обычный сель, а, безусловно, исключительно высоконапорный, скорость движения которого на порядок превышала обычную скорость движения селевых потоков в субгоризонтальных русловых донных условиях.

Таким образом, дальность действия взрывоподобного внезапного газодинамического выброса ледника Колка 20 сентября 2002 г., безусловно, не ограничивалась лишь вместилищем ледника Колка или Колкинским цирком, как иногда полагают, а захватывала огромную территорию Колкинского и Геналдонского ущелий и была ограничена (да и то не полностью) лишь непреодолимой механической преградой Скалистого хребта [Заалишвили и др., 2005; Заалишвили, Мельков, 2012; Haebertli et al., 2004; Huggel et al., 2005; Zaalishvili, Melkov, 2014; Kaab et al., 2021].

Необходимо иметь в виду, что продолжительность движения начальной фазы Геналдонского потока от момента ее зарождения в эпицентре газодинамического выброса до момента столкновения (воздушного наброса) с южным склоном Скали-



стого хребта неизвестна и захватывает не всю (полную) продолжительность выброса, а только его начальную часть. Это же касается и продолжительности движения каждой последующей фазы Геналдонского потока от момента начала их движения в эпицентральной зоне выброса во вместилище ледника Колка до отложения (осаждения и остановки) в Геналдонском ущелье.

Начальная скорость движения различных частиц ледово-каменного материала при выбросе ледника Колка, как и дальность их выброса, были существенно различными (в исследованиях по физике взрыва [Баум и др., 1975, с. 634; Андреев и др., 2004, с. 745; и др.] этот вопрос получил достаточное общее разъяснение).

Из физики взрыва [Баум и др., 1975, с. 634], по результатам экспериментальных исследований подземных взрывов на выброс, известно, в частности, что «при выбросе различные частицы грунта получают разные начальные скорости. Наибольшую скорость получают частицы, лежащие на оси симметрии взрыва. Чем дальше от этой оси лежат частицы грунта, тем меньшую скорость они получают, поскольку в этих направлениях возрастает слой метаемого грунта и увеличиваются диссипативные потери. В результате при подземном взрыве на выброс образуется расширяющийся купол грунта, который затем разрушается на отдельные частицы. Эти частицы грунта продолжают полет в воздухе по законам баллистики, их траектория зависит от начальной скорости, угла вылета, коэффициента формы и массы частицы.

Часть выброшенного взрывом грунта падает назад в воронку. Профиль воронки уменьшается также за счет разрушения краев воронки. В результате видимый профиль воронки меньше воронки, непосредственно образованной взрывом до ее частичной засыпки».

Приведенное описание вполне объясняет, в частности, различную дальность отброса разных обломков ледово-каменного материала продуктов разрушения ледника Колка, наличие некоторых так называемых останцов в ложе ледника и на небольшом удалении от него, состояние воронки (полости) выброса, наблюдавшееся вскоре после выброса ледника и в последующем, заброс некоторого количества ледово-каменного материала ледника Колка высоко на скалы в эпицентральной зоне выброса и вблизи от нее (так называемые примазки) и некоторые другие факты, описанные различными исследователями Колкинской катастрофы.

В целом же необходимо заметить, что, несмотря на очень широкую и весьма длительную историю изучения, внезапный газодинамический выброс – сравнительно мало изученное явление. Впервые же установленный лишь в 2002 году взрывоподобный направленный газодинамический выброс ледника, представляющий собой новое, ранее неизвестное катастрофическое природное явление, – тем более, пока крайне мало изучен и в эмпирическом, и, особенно, в теоретическом плане.

Небезынтересно отметить в плане сравнения, что, несмотря на высокий уровень современной вулканологии, весьма длительную историю ее развития, сравнительную многочисленность вулканических извержений, имеющийся большой опыт их наблюдения и изучения, а также изучения сформированных ими накоплений, направленные вулканические взрывы впервые были установлены, диагностированы (идентифицированы в качестве направленных вулканических взрывов) и выделены в качестве особого типа вулканических извержений лишь после проявления и глубокого изучения гигантского направленного взрыва камчатского вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. [Горшков, 1963]. Как заметили по данному поводу Г.С. Горшков и Ю.М. Дубик [1969, с. 35], «извержения такого типа наблюдались и

ранее в других областях, но не были правильно поняты». В частности, в какой-то мере эталонные в данном отношении, так сказать, генотипические продукты извержения японского вулкана Бандай 15 июля 1888 года в течение длительного времени «рассматривались не как взрывные, а как образовавшиеся в результате обвала или оползня [там же] (см. также [Горшков, Богоявленская, 1965, с. 160]).

Как известно, именно так, как обвал, ледниковую (гляциодинамическую) подвижку оползневого характера и сель рассматривали, а в значительной мере все еще продолжают рассматривать и Колкинскую катастрофу 20 сентября 2002 года в эпицентральной области ее проявления.

После установления (идентификации) Г. С. Горшковым направленных вулканических взрывов как особого типа вулканических извержений для идентификации взрывоподобных направленных газодинамических выбросов ледников (неоднократно происходивших и в XX, и в XIX, и в XVIII вв., и, безусловно, ранее) потребовались еще почти полвека, в течение которых в различных районах мира произошли несколько совершенно неожиданных гигантских ледниковых катастроф, в которых погибли десятки тысяч людей. И лишь гигантская, крупнейшая в истории человечества по объему выброшенного материала (порядка 100 млн м<sup>3</sup>) ледниковая катастрофа, происшедшая 20 сентября 2002 года на леднике Колка и в Геналдонском ущелье, позволила установить (диагностировать, идентифицировать) внезапные взрывоподобные направленные газодинамические выбросы ледников [Бергер, 2006а, б, 2007 и др.], выделить их в качестве особого, ранее неизвестного геодинамического типа пароксизмальных ледниковых пульсаций (и чрезвычайно опасных природных явлений катастрофического уровня) и положила начало их целенаправленному изучению с учетом их глубинной эндогенной в значительной мере поствулканической газодинамической природы.

### Методы работы

Имеет смысл, однако, определить величину начальной скорости массового движения *основного количества* компактно выброшенного ледово-каменного материала продуктов разрушения ледника Колка с использованием методики расчета начальной скорости продуктов направленных вулканических взрывов, изложенной, в частности, в работе А. Е. Шейдеггера [1981, с. 62-63] и применяемой вулканологами [Горшков, Богоявленская, 1965; Ермаков, 1969; и др.]:

$$V_0 = \sqrt{Lg},$$

где  $V_0$  – начальная скорость выброшенного материала, м/с;

$L$  – дальность выброса, м;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Использование этой формулы в случаях, когда выбрасывание материала происходит под углом, существенно отличающимся от 45°, дает заниженные, по сравнению с действительными, значения начальной скорости  $V_0$ .

Если принять дальность выброса (компактного инерциального движения по воздуху в зоне транзита) основного количества ледово-каменного материала продуктов разрушения ледника Колка, равной 9-10 км, что близко к минимальной ее величине [Никитин и др., 2007; Дробышев, 2012; Черноморец, 2005; Петраков и др., 2004], то, согласно приведенной формуле, получаем, что начальная скорость выброса этого материала (максимальная массовая скорость движения выброшен-

ного материала, достигнутая на стадии газового ускорения в эпицентральной зоне выброса) составляла около 300 м/с.

По данным М. Ю. Никитина и др. [2007, с. 8], «протяженность зоны транзита до южного склона Скалистого хребта для основной стадии выброса составляет 13,5 км». В эту величину, очевидно, не включена зона начального движения [Черноморец, 2005, с. 112] продуктов разрушения ледника Колка от эпицентра выброса в тыльной части ледника Колка до поворота долины у языка ледника Майли.

Необходимо также учитывать, что наиболее высокоскоростная начальная часть Геналдонского ледово-каменного потока и следовавшая за ней его основная часть, разделяемые на основе имеющихся фактов М. Ю. Никитиным и др. [2007], были остановлены лишь непреодолимой механической преградой Скалистого хребта. Совершенно очевидно, что для этих стадий наблюдаемая дальность выброса ледово-каменных продуктов разрушения ледника Колка существенно меньше той, какой она была бы при беспрепятственном их движении (а именно такая, а не ограниченная непреодолимыми преградами дальность выброса должна учитываться при определении величины начальной скорости движения выброшенного материала).

### Результаты работы и их обсуждение

Так что полученная начальная скорость выброса существенно меньше действительной ее величины.

Именно столь высокие значения величины начальной массовой скорости выброса основного количества ледово-каменного материала определили возможность образования сопутствовавшей выбросу *ударной воздушной волны*, которая и на большом расстоянии от эпицентра выброса (порядка 15 км) все еще имела значительную интенсивность [Никитин и др., 2007; Заалишвили и др., 2008; Супруненко, 2005; Панов и др., 2002; Кусов, 2006; Васьков, 2004; Васьков и др., 2004; и др.]. Согласно М. А. Садовскому [1994, с. 36], выдающемуся специалисту в области геофизики и физики взрыва, «следует думать, что одним из основных критериев, определяющих возможность образования ударной волны, является величина массовой скорости продуктов взрыва, достаточная для того, чтобы сообщаемая воздуху энергия не успевала рассеиваться звуковыми волнами».

Одно только это полностью исключает любые предположения о срыве, соскальзывании (сдвиге, выскальзывании и т. п.) ледника Колка, а заодно опровергает и многочисленные мнения о гляциальной, гидрогляциальной, гидравлической, селевой, гравитационно-гидравлической, склоново-гравитационной, импактно-гидравлической, импактной (обвально-ударной), сейсмотектонической и т. п. природе Колкинской катастрофы, решающей роли воды, набора ледником некой критической массы, гравитационного агента переноса, а также многих других упоминаемых различными авторами факторов в этой катастрофе, за исключением газового.

При всех генетических, вещественных и других различиях между отложениями взрывоподобного направленного газодинамического выброса ледника Колка и отложениями направленных вулканических взрывов, в частности, отложениями, возникшими в результате пароксизмального эксплозивного извержения вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. [Горшков, Богоявленская, 1965; Мелекесцев, 2004; и др.], нельзя не заметить некоторое седиментологическое сходство между ними, что обусловлено, прежде всего, значительными элементами сходства основного механизма транспортировки (инерциального движения по воздуху) и субаэрального

характера среды накопления основного количества этих отложений при ведущей роли в процессах выброса материала сверхвысокого давления природных газов – в одном случае (на леднике Колка) поствулканических, в другом (на вулкане Безымянный) – собственно вулканических.

### Выводы

Основной причиной, основным действующим фактором, вызывающим переход от равновесных условий к сильно неравновесным, обуславливающим неустойчивость природных систем (соответственно, вулканических и ледниковых) и вызывающим проявление грандиозных пароксизмальных природных катастроф взрывного и взрывоподобного направленного газодинамического характера, и в том, и в другом случае являются высоконапорные глубинные природные газы и перенос ими гигантских давлений в верхние горизонты земной коры.

Во многом сходными в некоторых случаях являются и отложения, возникшие в результате этих явлений, в связи с чем не приходится удивляться тому, что генезис таких отложений (ледниковый или же вулканический) иногда остается в течение десятилетий дискуссионным, как, например, в случае отложений у подножия камчатского вулкана Камень (одного из вулканов Ключевской группы) [Ермаков, 1969 и др.].

В частности, как известно [Горшков, Богоявленская, 1965, с. 76 и 162; и др.], при направленных вулканических взрывах, наряду со средне-, мелко- и тонкодисперсным материалом (ювенильным и резургентным), выбрасываются и крупные глыбы, иногда объемом в десятки кубических метров. Подобные же гигантские глыбы (именуемые «останцами» или «массивами льда и камней» [Черноморец, 2005, с. 113-114]) были выброшены и при направленном выбросе ледника Колка 20 сентября 2002 г. Аналогичные явления были отмечены и при предыдущей пароксизмальной катастрофе на леднике Колка и в Геналдонском ущелье в 1902 г., в том числе на значительном удалении (более 6 км) от ледника и, что особенно существенно, на значительной высоте (не менее 60 м над дном долины) [Поггенполь, 1905, с. 6], «отдельные же глыбы были подброшены на высоту 140 метров» [Поггенполь, 1905, с. 11].

Приведенные в данной работе и многие другие факты свидетельствуют об огромной мощности взрывоподобных направленных газодинамических выбросов ледника Колка, вполне сопоставимых в данном отношении с крупными направленными вулканическими взрывами.

### Литература

1. Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А., Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Колпаков В.И., Ладов С.В., Одинцов В.А., Орленко Л.П., Охитин В.Н., Селиванов В.В., Соловьев В.С., Станюкович К.П., Челышев В.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. / Под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е, испр. В 2 т. Т. 1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 832 с.
2. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П., Челышев В.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. / Под ред. К.П. Станюковича. Изд. 2-е, перераб. – М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. лит., 1975. – 704 с.
3. Бергер М.Г. Природная катастрофа на леднике Колка 20 сентября 2002 г. – внезапный газодинамический выброс ледника. // Предупреждение опасных ситуаций в высокогорных районах: Доклады Международной конференции. Владикавказ-Москва, 23-26 июня 2004 г. – Владикавказ: Олимп, 2006а. – С. 41-49.
4. Бергер М.Г. Газодинамический выброс ледника Колка 20 сентября 2002 г. // Вестник Владикавказского научного центра РАН и СО-А. – 2006б. – Т. 6. №2. – С. 33-37.

5. Бергер М. Г. Ледник Колка: Катастрофа 20 сентября 2002 г. – внезапный газодинамический выброс ледника. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. – 248 с.
6. Васьков И. М. Возможный механизм обвала и динамика движения ледово-каменных масс в верховьях р. Геналдон (на Центральном Кавказе в сентябре 2002 года). // Вестник Владикавказского научного центра РАН и РСО-А. – 2004. – Т. 4. № 2. – С. 34-45.
7. Васьков И. М., Долгов Г. А., Музаев И. Д., Пикалюк Г. В. Динамика движения масс ледово-каменного обвала в верховьях р. Геналдон РСО-А 20 сентября 2002 года. // Вестник Владикавказского научного центра РАН и РСО-А. – 2004. – Т. 4. № 1. – С. 18-26.
8. Горшков Г. С. Направленные вулканические взрывы // Геология и геофизика. – 1963. – № 12. – С. 25-31.
9. Горшков Г. С., Богоявленская Г. Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения (1955-1963 гг.). – М.: Наука, 1965. – 172 с.
10. Горшков Г. С., Дубик Ю. М. Направленный взрыв на вулкане Шивелуч. // Вулканы и извержения. – М.: Наука, 1969. – С. 3-37.
11. Дробышев В. Н. Гляциальная катастрофа Северной Осетии 20 сентября 2002 года. // Вестник Владикавказского научного центра РАН и РСО-А. – 2012. – Т. 12. № 3. – С. 20-36.
12. Ермаков В. А. Отложения направленного взрыва вулкана Камень. // Вулканы и извержения. – М.: Наука, 1969. – С. 82-93.
13. Заалишвили В. Б., Бондырев И. В., Невская Н. И., Невский Л. Н. Макросейсмическое обследование зоны схода ледника Колка 20 сентября 2002 года. // Опасные природные и техногенные геологические процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа: Труды Международной научно-практической конференции. Владикавказ, 20-22 сентября 2007 г. – Владикавказ: ВНЦ РАН и РСО-А, 2008. – С. 174-184.
14. Заалишвили В. Б., Невская Н. И., Макиев В. Д., Мельков Д. А. Интерпретация инструментальных данных процесса схода ледника Колка 20 сентября 2002 года. // Вестник Владикавказского научного центра. – 2005. – № 3. – С. 43-54.
15. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А. Особенности процесса схода ледника Колка 20 сентября 2002 г. и его макросейсмическое проявление по инструментальным данным современных регистрационных систем. // Геология и геофизика Юга России. – 2012. – № 3. – С. 29-44.
16. Мелекसेцев И. В. О взрывном происхождении обломочной лавины пароксизмальной фазы катастрофического извержения вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. на Камчатке. // Вулканология и сейсмология. – 2004. – № 2. – С. 9-23.
17. Никитин М. Ю., Гончаренко О. А., Галушкин И. В. Динамика и стадийность развития Геналдонского ледово-каменного потока на основе дистанционного анализа. // Вестник Владикавказского научного центра РАН и РСО-А. – 2007. – Т. 7. № 3. – С. 2-15.
18. Панов В. Д., Ильичев Ю. Г., Лурье П. М. Ледниковый обвал в горах Северной Осетии в 2002 г. // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 12. – С. 94-98.
19. Петраков Д. А., Тутубалина О. В., Черноморец С. С. По следам Геналдонской катастрофы: год спустя. // Криосфера Земли. – 2004. – Т. VIII. № 1. – С. 29-39.
20. Поггенполь Н. В. По северным долинам Казбекского массива и первое восхождение на Майли-хох. // Ежегодник Русского горного общества. 1903. – 1905. – Вып. III. – С. 1-37.
21. Садовский М. А. Механическое действие воздушных ударных волн по данным экспериментальных исследований. // Механическое действие взрыва. Сборник. – М.: ИДГ РАН, 1994. – С. 7-102.
22. Супруненко Ю. Были предсказуем сход Колки? // Техника молодежи. – 2005. – № 12. – С. 24-26.
23. Черноморец С. С. Селевые очаги до и после катастроф. – М.: Научный мир, 2005. – 184 с.
24. Шейдеггер А. Е. Физические аспекты природных катастроф. – М.: Недра, 1981. – 232 с.
25. Haerberli W., Huggel C., Kaab A., Zraggen-Oswald S., Polkvoj A., Galushkin I., Osokin N. The Kolka-Karmadon rock/ice slide of 20 September 2002: an extraordinary event of

historical dimensions in North Ossetia, Russian Caucasus. // *Journal of Glaciology*. – 2004. – Vol. 50 (171). – pp. 533-546. <https://doi.org/10.3189/172756504781829710>

26. Huggel C., Zraggen-Oswald S., Haerberli W., Kaab A., Polkvoj A., Galushkin I., Evans S.G. The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery. // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2005. – Vol. 5 (2). – pp. 173-187. <https://doi.org/10.5194/nhess-5-173-2005>

27. Kaab A., Jacquemart M., Gilbert A., Leinss S., Girod L., Huggel C., Kargel J.S. Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers more frequent than thought? // *Cryosphere*. – 2021. – Vol. 15 (4). – pp. 1751-1785. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1751-2021>

28. Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. // *Izvestiya-Physics of the Solid Earth*. – 2014. – Vol. 50. No. 5. – pp. 707-718. DOI: 10.1134/S1069351314050097

## References

1. Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I., Ladov S.V., Odintsov V.A., Orlenko L.P., Okhitin V.N., Selivanov V.V., Soloviev V.S., Stanyukovich K.P., Chelyshev V.P., Shekhter B.I. Explosion physics. Ed. 3<sup>rd</sup>, rev. In 2. Vol. 1. Moscow. FIZMATLIT, 2004. 832 p. (In Russ.)

2. Baum F.A., Orlenko L.P., Stanyukovich K.P., Chelyshev V.P., Shekhter B.I. Explosion physics. Ed. 2nd, rev. Moscow. Nauka. Main editorial office phys.-math. lit., 1975. 704 p.

3. Berger M.G. Natural disaster on the Kolka glacier on September 20, 2002 – a sudden gas-dynamic glacier outburst. In: Reports of the International Conference “Prevention of dangerous situations in high-mountainous areas”. Vladikavkaz-Moscow, June 23-26, 2004 Vladikavkaz. Olympus, 2006a. pp. 41-49. (In Russ.)

4. Berger M.G. Gas-dynamic outburst of the Kolka glacier on September 20, 2002. Bulletin of the VSC RAS and RNO-A, 2006b. Vol. 6. No. 2. pp. 33-37. (In Russ.)

5. Berger M.G. Kolka Glacier: Catastrophe on September 20, 2002 – a sudden gas-dynamic glacier outburst. Moscow. LKI, 2007. 248 p. (In Russ.)

6. Vaskov I.M. Possible mechanism of collapse and dynamics of movement of ice-stone masses in the upper reaches of the river Genaldon (in the Central Caucasus in September 2002). Bulletin of the VSC RAS and RNO-A, 2004. Vol. 4. No. 2. pp. 34-45. (In Russ.)

7. Vaskov I.M., Dolgov G.A., Muzaev I.D., Pikalyuk G.V. The dynamics of the movement of the masses of the ice-rock avalanche in the upper reaches of the river. Genaldon RNO-A September 20, 2002. Bulletin of the VSC RAS and RNO-A, 2004. Vol. 4. No. 1. pp. 18-26. (In Russ.)

8. Gorshkov G.S. Directed volcanic explosions. *Geology and Geophysics*, 1963. No. 12. pp. 25-31. (In Russ.)

9. Gorshkov G.S., Bogoyavlenskaya G.E. Bezmyanny volcano and features of its last eruption (1955–1963). Moscow. Nauka, 1965. 172 p. (In Russ.)

10. Gorshkov G.S., Dubik Yu.M. Directional explosion on Shiveluch volcano. *Volcanoes and eruptions*. Moscow. Nauka, 1969. pp. 3-37. (In Russ.)

11. Drobyshev V.N. The glacial catastrophe of North Ossetia on September 20, 2002. Bulletin of the VSC RAS and RNO-A. 2012. Vol. 12. No. 3. pp. 20-36. (In Russ.)

12. Ermakov V.A. Deposits of the directed explosion of the Kamen volcano. *Volcanoes and eruptions*. Moscow. Nauka, 1969. pp. 82-93. (In Russ.)

13. Zaalishvili V.B., Bondyrev I.V., Nevskaya N.I., Nevsky L.N. Macro seismic survey of the Kolka glacier collapse zone on September 20, 2002. In: Proceedings of the International Conference Hazardous natural and technogenic geological processes in the mountainous and foothill territories of the North Caucasus. Vladikavkaz, September 20-22, 2007. Vladikavkaz. VSC RAS and RNO-A, 2008. pp. 174-184. (In Russ.)

14. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Makiev V.D., Melkov D.A. Interpretation of the instrumental data on the Kolka rock/ice surge on September 20, 2002. *Vestn. Vladikavkaz. Nauch. Tsentra*, 2005. – Vol. 5. No. 3. pp. 43-54. (In Russ.)
15. Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Features of process and macroseismic evidence of glacier Kolka fall 20 September 2002 on instrumental data of modern observation systems. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2012. No. 3. pp. 29-44. (in Russ.).
16. Meleksetsev I.V. On the explosive origin of the debris avalanche of the paroxysmal phase of the catastrophic eruption of Bezmyanny volcano on March 30, 1956 in Kamchatka. *Volcanology and seismology*, 2004. No. 2. pp. 9-23. (In Russ.)
17. Nikitin M. Yu., Goncharenko O. A., Galushkin I. V. Dynamics and development stages of the Genaldon ice-rock stream based on remote sensing analysis. *Bulletin of the VSC RAS and RNO-A*, 2007. Vol. 7. No. 3. pp. 2-15. (In Russ.)
18. Panov V.D., Ilyichev Yu.G., Lurie P.M. Glacial landslide in the mountains of North Ossetia in 2002. *Meteorology and Hydrology*, 2002. No. 12. pp. 94-98. (In Russ.)
19. Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Chernomorets S.S. In the wake of the Genaldon catastrophe: a year later. *Cryosphere of the Earth*, 2004. Vol. VIII. No. 1. pp. 29-39. (In Russ.)
20. Poggenpol N.V. Along the northern valleys of the Kazbek massif and the first ascent of Maili-Khokh. *Yearbook of the Russian Mining Society*, 1903. 1905. Issue III. pp. 1-37. (In Russ.)
21. Sadovsky M.A. Mechanical action of air shock waves according to experimental studies. *Mechanical action of the explosion*. Collection. Moscow. IDG RAS, 1994. pp. 7-102. (In Russ.)
22. Suprunenko Yu. Was Kolka glacier collapse predictable? *Technology of youth*, 2005. No. 12. pp. 24-26. (In Russ.)
22. Chernomorets S. S. *Mudflow sources before and after disasters*. Moscow. Nauchnyi mir, 2005. 184 p. (In Russ.)
24. Sheidegger A. E. *Physical aspects of natural disasters*. Moscow. Nedra, 1981. 232 p. (In Russ.)
25. Haeblerli W., Huggel C., Kaab A., Zraggen-Oswald S., Polkvoj A., Galushkin I., Osokin N. The Kolka-Karmadon rock/ice slide of 20 September 2002: an extraordinary event of historical dimensions in North Ossetia, Russian Caucasus. *Journal of Glaciology*, 2004. Vol. 50 (171). pp. 533-546. <https://doi.org/10.3189/172756504781829710>
26. Huggel C., Zraggen-Oswald S., Haeblerli W., Kaab A., Polkvoj A., Galushkin I., Evans S.G. The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2005. Vol. 5 (2). pp. 173-187. <https://doi.org/10.5194/nhess-5-173-2005>
27. Kaab A., Jacquemart M., Gilbert A., Leinss S., Girod L., Huggel C., Kargel J. S. Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers more frequent than thought? *Cryosphere*, 2021. Vol. 15 (4). pp. 1751-1785. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1751-2021>
28. Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. *Izvestiya-Physics of the Solid Earth*, 2014. Vol. 50. No. 5. pp. 707-718. DOI: 10.1134/S1069351314050097

УДК 550:34

DOI: [10.46698/VNC.2021.70.17.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.70.17.009)

Оригинальная статья

## Сравнительный анализ динамических характеристик зданий различных типов при микросейсмических колебаниях

Дж. К. Карапетян , О. Ю. Айрапетян , Г. М. Матевосян ,  
Р. К. Карапетян 

Институт геофизики и инженерной сейсмологии им А. Назарова НАН РА, Республика Армения, 3115, г. Гюмри, ул. В. Саргсяна, 5, e-mail: jon\_iges@mail.ru; hhmy39@gmail.com

Статья поступила: 03.08.2021, доработана: 20.08.2021, принята к публикации: 27.08.2021

**Резюме: Актуальность работы.** Изучение поведений зданий в натуральных условиях и сравнительный анализ их динамических характеристик считается важной задачей научно-исследовательского и прикладного характера, в частности, для мониторинга их технического состояния и паспортизации, что является актуальным особенно на территории Армении, принимая во внимание интенсивную высокосейсмичность района. В работе приводятся экспериментальные результаты исследований динамических характеристик 6 жилых зданий разной этажности, возведенных в различных грунтовых условиях, от записей микросейсм с помощью специально разработанных в ИГИС НАН РА сейсмических приборов. Выбор зданий был осуществлен с учетом того, что ранее на них проводились эксперименты для выявления их динамических характеристик. **Целью работы** является проверка фактического состояния зданий, сопоставление фактических и прежде приобретенных динамических характеристик исследуемых зданий. **Методы работы.** Примененная нами методика изучения поведения зданий проведена с помощью мобильной сеймостанции, состоящей из трех приемников – сейсмодатчиков СМ-3 (два горизонтальных и один вертикальный компонент), общего блока преобразования, управления и регистрации производства ИГИС НАН РА. С помощью этого блока можно вести онлайн наблюдение записей, которые представляются на мониторе ноутбука. На каждом этаже и во всех секциях исследуемых зданий, а также на грунте основания проводились измерения микросейсм. Определялись периоды колебаний зданий и для грунтов в поперечном, в продольном и вертикальном направлениях. Измерения были произведены в ночное время для того, чтобы колебания грунта и зданий были вызваны только естественными микросейсмами. **Результаты работы.** В результате проведен сравнительный анализ полученных экспериментальных величин динамических характеристик и ранее приобретенных данных. Выявлены основные закономерности изменений динамических характеристик при микросейсмических колебаниях и дана оценка о состоянии зданий. Обнаружены особенности совместной работы зданий и грунтов. Фактические значения периодов, приобретенные для исследуемых зданий, были сопоставлены с соответствующими данными, представленными в действующих нормативных документах.

**Ключевые слова:** микросейсмы, динамические характеристики, спектральный анализ, спектр Фурье, периоды колебаний зданий.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке КН РА (грант АСН-01/21).

**Для цитирования:** Карапетян Дж. К., Айрапетян О. Ю., Матевосян Г. М., Карапетян Р. К. Сравнительный анализ динамических характеристик зданий различных типов при микросейсмических колебаниях. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (3): 103 – 114. DOI: [10.46698/VNC.2021.70.17.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.70.17.009).



DOI: [10.46698/VNC.2021.70.17.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.70.17.009)

Original paper

## Comparative analysis of the dynamic characteristics of various types of buildings during microseismic vibrations

J. K. Karapetyan , H. Yu. Hayrapetyan , G. M. Matevosyan ,  
R. K. Karapetyan 

Institute of Geophysics and Engineering Seismology after A. Nazarov  
of NAS RA, 5 V. Sarksyan Str., Gyumri 3115, Republic of Armenia,  
e-mail: jon\_iges@mail.ru; hhmy39@gmail.com

Received: 03.08.2021, revised: 20.08.2021, accepted: 27.08.2021

**Abstract: Relevance.** The study of the behavior of buildings in natural conditions and a comparative analysis of their dynamic characteristics is considered an important task of scientific research and applied nature, in particular, for monitoring their technical condition and certification. This task is relevant especially in the territory of Armenia, taking into account the intensive high seismicity of the region. The paper presents the experimental results of studies of the dynamic characteristics of 6 residential buildings of different storeys, erected in different soil conditions, from recordings of microtremors using seismic instruments specially developed at IGES NAS RA. The choice of the buildings has been carried out taking into account the fact that earlier experiments had been carried out on them to identify their dynamic characteristics. **The aim** of the work is to check the actual state of buildings, to compare the actual and previously acquired dynamic characteristics of the buildings under study. **Methods.** Our methodology for studying the behavior of buildings have been carried out using a mobile seismic station, consisting of three receivers – seismic sensors SM-3 (two horizontal and one vertical component), a general unit for transformation, control and registration powered by IGES NAS RA. With the help of this logger, it is possible to conduct online monitoring of the records that are presented on the laptop monitor. Microtremor measurements have been carried out on each floor and in all sections of the buildings under study, as well as on the basement soil. The vibration periods of buildings and soil have been also determined in the transverse, longitudinal and vertical directions. The measurements have been taken at night to ensure that only natural microseismic vibrations have been caused on the soils and buildings. **Results.** As a result, we have carried out a comparative analysis of the obtained experimental values of dynamic characteristics and previously acquired data. The main regularities of changes in dynamic characteristics during microseisms are revealed and an assessment of the condition of the buildings is given. The features of the joint work of buildings and soils have been discovered. The actual values of the periods acquired for the buildings under study have been compared with the corresponding data presented in the current regulatory documents.

**Keywords:** microseisms, dynamic characteristics, spectral analysis, Fourier spectrum, vibration periods of buildings.

**Acknowledgments:** *The research was carried out with financial support of SC RA (grant ACH-01/21).*

**For citation:** Karapetyan J. K., Hayrapetyan H. Yu., Matevosyan G. M., Karapetyan R. K. Comparative analysis of the dynamic characteristics of various types of buildings during microseismic vibrations. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (3): 103 – 114. DOI: 10.46698/VNC.2021.70.17.009.

## Введение

В 1960-1970 гг. учеными Б.К. Карапетяном и Э.Е. Хачияном в городе Ереване были проведены серии экспериментальных исследований по определению периодов и форм колебаний ряда зданий с разными конструктивными схемами [Карапетян, 1967; Хачиян, 1973].

В данных экспериментах динамические характеристики зданий измерялись экспериментальным методом с помощью малых колебаний зданий, вызванных микросейсмическими воздействиями, и путем их испытания при помощи специальной вибромашины, а еще при сейсмозрывных воздействиях.

В результате этих экспериментов Б.К. Карапетяном и Э.Е. Хачияном были определены динамические характеристики, соответственно 50 и 58 жилых зданий различных типов [Карапетян, 1967; Хачиян, 1973].

Однако в течение длительного времени таких исследований по этим зданиям не проводилось. Поэтому очень важно провести периодические исследования над ними, определить динамические характеристики зданий, особенности и закономерности спектрального состава колебаний, сравнить с ранее полученными данными и сделать соответствующие выводы и рекомендации.

Из вышеперечисленных зданий, мы избрали некоторое количество зданий, провели экспериментальное исследование и выяснили их фактическое состояние, а также сравнили их с ранее приобретенными данными. Работа имеет продолжительный характер, с целью выявления фактических динамических характеристик и для остальных зданий.

Задачей исследования было определение периодов колебаний 6 жилых зданий и проверка фактического состояния зданий, сравнение их динамических характеристик с данными полученных от ранее проведенных работ и с соответствующими нормативными значениями, а также сопоставление с преобладающими периодами грунтов их оснований.

## Методика исследования

Примененная нами методика исследования поведения зданий осуществлена с использованием мобильной сейсмостанции, состоящей из 3-х сейсмодатчиков СМ-3 – двух горизонтальных и одного вертикального компонента, а также логгера производства ИГИС НАН РА, оборудованным беспроводной сетью (Wi-Fi), которая обеспечивает связь с портативным компьютером (рис. 2). Частота записи – 200 отсчетов в секунду [Айрапетян, 2018; Карапетян и др., 2019; Karapetyan et al., 2020].

Устройства были поставлены на каждом этаже зданий, а также на грунте оснований. Измерения проведены ночью, для того чтобы колебания грунта и зданий были обусловлены только естественными микросейсмами.

Достоинства этого метода заключаются в том, что он прост и, следовательно, может быть применен для массовых исследований в разных периодах эксплуатации здания и сооружений [Аносов и др., 2010а, б; Еманов, Скляр, 2009; Заалишвили и др., 2016; Капустян и др., 2013; Оганесян, 2013; Савин и др., 2008; Хачиян, 2015; Ditommaso et al., 2012; Giacomo et al., 2005; Kapustian et al., 2013; Khachian et al., 2013; Mucciarelli, 2003; Nakamura, 1997? 2008; Zaalishvili et al., 2016].

Ниже представлены фотографии исследуемых зданий (рис. 1), а в таблице приведены их основные параметры и типы грунтов (табл. 1).



*Рис. 1. Исследуемые жилые здания /  
Fig. 1. Residential buildings under investigation*

Во всех этажах зданий и грунтов их оснований определялись их периоды колебаний в поперечном  $T_x$ , в продольном  $T_y$  и в вертикальном  $T_z$  направлениях. Был выполнен спектральный анализ по приобретенным экспериментальным данным инструментальной записи.

Построены спектры Фурье, полученные от измерений микросейсмических колебаний зданий различных конструктивных систем. Ниже в графиках приведены эти спектры для исследуемых зданий.

Таблица 1 / Table 1

**Основные параметры зданий и их грунтов /  
Main parameters of buildings and their soils**

№	Год возведе- ния здания / Year of con- struction of the building	Тип здания и конструктивные решения / Building type and design solutions	Размеры в плане, м (кол- во подъездов) / Dimensions in plan, m (number of en- trances)	Высота, м (кол-во этажей) / Height, m (number of floors)	Грунты основания / Foundation soils
1	1967 г.	3-хэтажное здание с каменными несущими стенами / Three-storeyed building with stone bearing walls	56,0 × 12,0 (4)	10,3 (3)	Галечники / Pebble stones
2	1963 г.	5-тиэтажное здание с каменными несущими стенами / Five-storeyed building with stone bearing walls	50,4 × 12,0 (3)	15,4 (5)	Галечники / Pebble stones
3	1965 г.	7-миэтажное каркасное здание с неполным каркасом и каменными наружными стенами / Seven-storeyed frame building with incomplete framework and stone exterior walls	19,5 × 11,7 (1)	25,2 (7)	Базальты / Basalts
4	1969 г.	7-миэтажное здание с комплексной конструкцией / Seven-storeyed building with composite structure	50,4 × 14,8 (3)	21,2 (7)	Валунно-гравийные грунты с песчаным заполнением / Boulder-gravel soils with sand filling
5	1968 г.	9-тиэтажное каркасное здание с панельными стенами / Nine-storeyed frame building with panel walls	39,0 × 12,0 (2)	35,25 (10)	Крупнообломочные базальтовые породы / Coarse basaltic rock
6	1970 г.	11-тиэтажное каркасное здание с панельными стенами / Eleven-storeyed frame building with panel walls	32,0 × 15,0 (2)	34,2 (11)	Суглинки со щебнем (60%) и туфы (40%) / Loam with crushed stone (60%) and tuff (40%)



Рис. 2. Мобильная сейсмостанция производства ИГИС НАН РА /

Fig. 2. Mobile seismic station produced by IGIS NAS RA

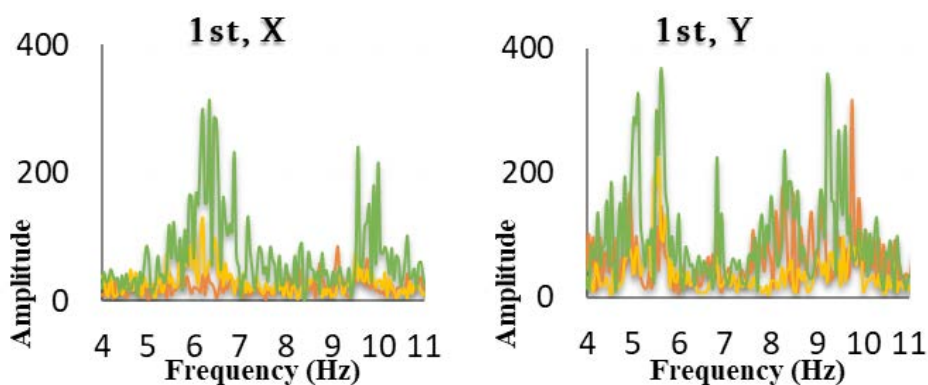


Рис. 3. Спектры Фурье, полученные для здания №1 на всех этажах в X, Y направлениях /  
Fig. 3. Fourier spectra obtained for building No. 1 at each storey in X, Y directions

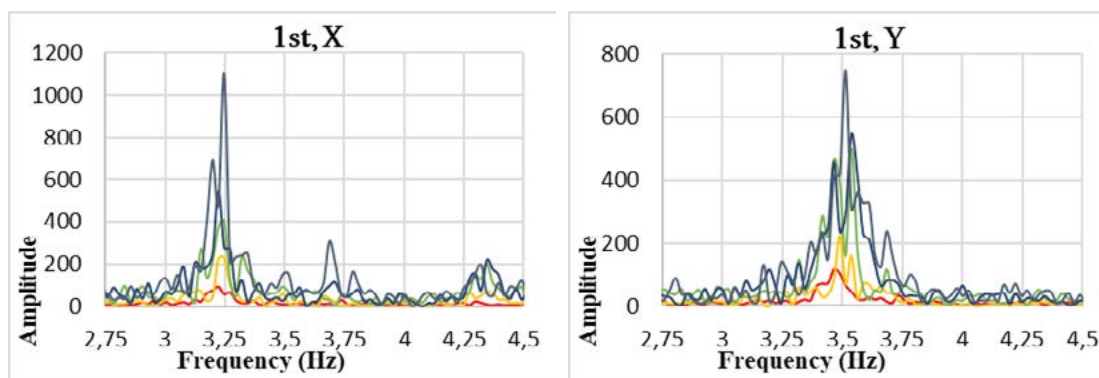


Рис. 4. Спектры Фурье, полученные для здания №2 на всех этажах в X, Y направлениях /  
Fig. 4. Fourier spectra obtained for building No. 2 at each storey in X, Y directions

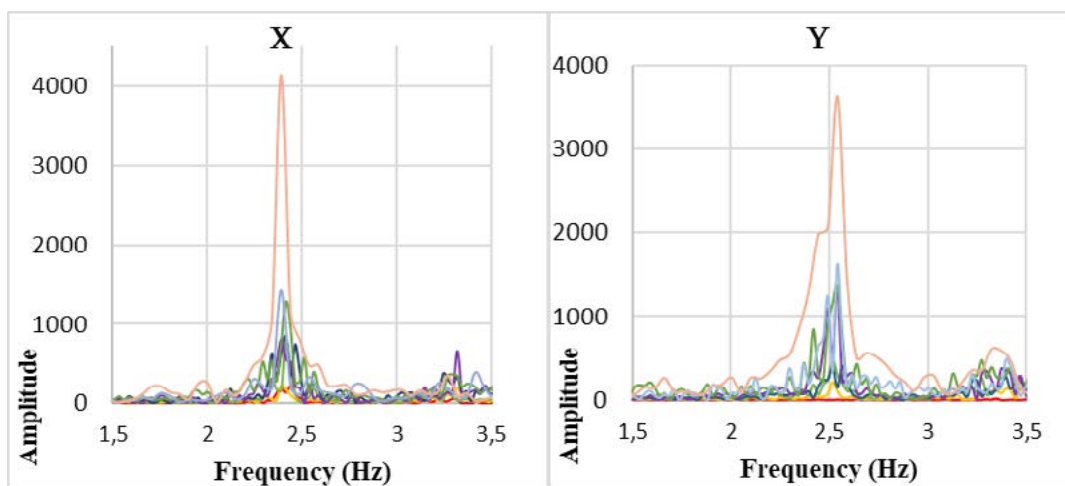


Рис. 5. Спектры Фурье, полученные для здания №3 на всех этажах в X, Y направлениях /  
Fig. 5. Fourier spectra obtained for building No. 3 at each storey in X, Y directions

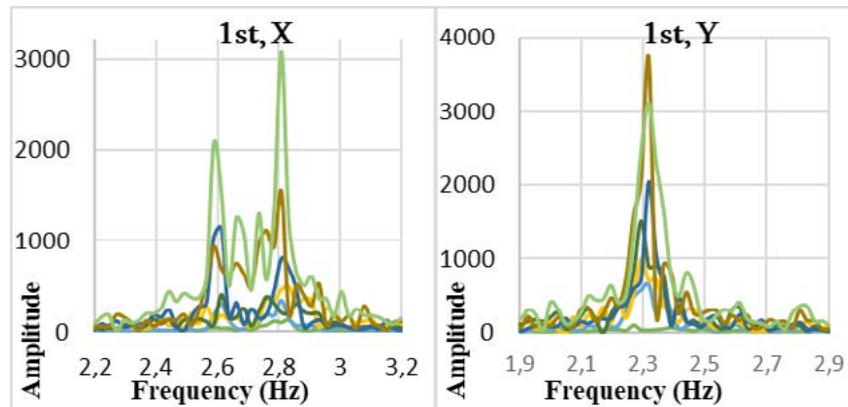


Рис. 6. Спектры Фурье, полученные для здания № 4 на всех этажах в X, Y направлениях /  
 Fig. 6. Fourier spectra obtained for building No. 4 at each storey in X, Y directions

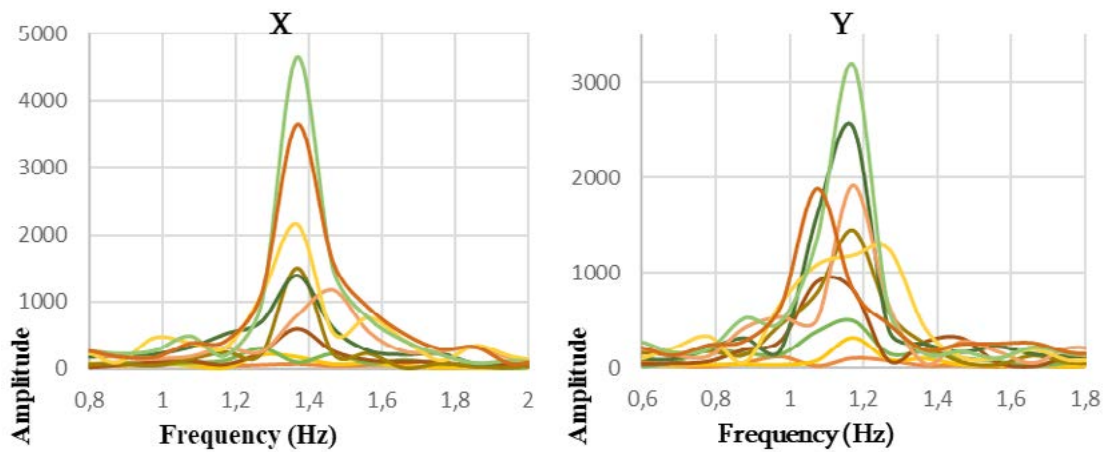


Рис. 7. Спектры Фурье, полученные для здания № 5 на всех этажах в X, Y направлениях /  
 Fig. 7. Fourier spectra obtained for building No. 5 at each storey in X, Y directions

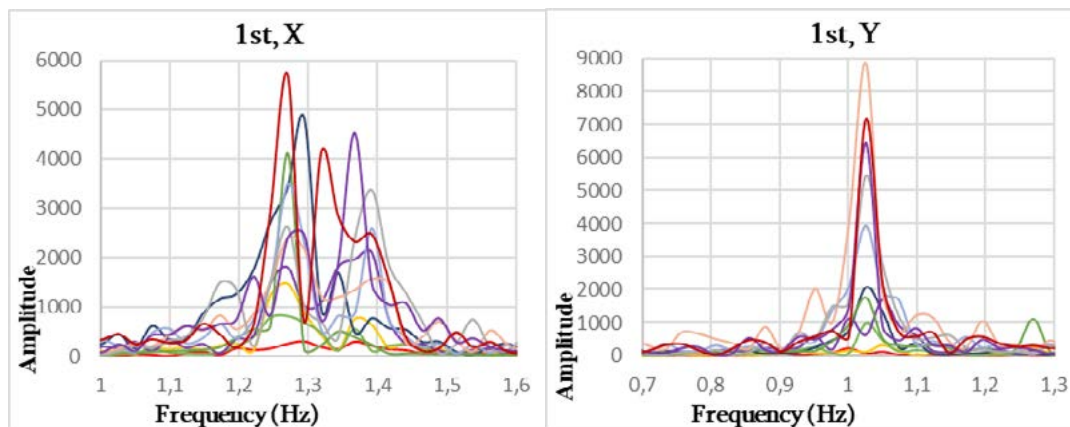


Рис. 8. Спектры Фурье, полученные для здания № 6 на всех этажах в X, Y направлениях /  
 Fig. 8. Fourier spectra obtained for building No. 6 at each storey in X, Y directions

Проведен временной анализ динамических параметров зданий, выполнено сравнение фактических и расчетных значений, приведенных в действующих нормативах. В таблице 2 приведены периоды измеренных колебаний жилых зданий, их старые экспериментальные значения, соответствующие данные, приведенные в нормативных документах и полученные различия в процентах.

Таблица 2 / Table 1

**Динамические параметры зданий и их сравнение /  
Dynamic parameters of buildings and their comparison**

№	Тип здания и конструктивные решения / Building type and design solutions	Измеренный период собств. колебаний / Measured period of natural vibrations			Старое экспер. значение периода и раз- ница в % / Old expert value of the period and the difference in %		Нормативное значение периода колебаний T <sub>1</sub> , с / Regulatory value of vibration period T <sub>1</sub> , s	
		T <sub>X</sub> , с	T <sub>Y</sub> , с	T <sub>Z</sub> , с	T <sub>X</sub> <sup>стп</sup> , с	T <sub>Y</sub> <sup>стп</sup> , с	% X	% Y
1	3-этажное здание с каменными несущими стенами / Three-storeyed building with stone bearing walls	0,159	0,179	0,10	0,154 3...4,5% 12%	0,154 11...17%	0,165	
		0,136	0,18	0,102			3% 17,5%	4...9%
		0,161	0,178	0,093				
		0,160	0,171	0,096				
2	5-тиэтажное здание с каменными несущими стенами / Five-storeyed building with stone bearing walls	0,309	0,285	0,089	0,25 23,5% 8...9%	0,25 14...15%	0,275	
		0,27	0,287	0,086			12,5%	3,5...4,5%
		0,272	0,286	0,087				
3	7-миэтажное каркас- ное здание с неполным каркасом и каменными наружными стенами / Seven-storeyed frame building with incomplete framework and stone exterior walls	0,415	0,395	0,115	0,357 16%	0,357 11%	-	
4	7-миэтажное здание с комплексной конструк- цией / Seven-storeyed building with composite structure	0,363	0,434	0,435	0,34 6...7%	0,39 11%	0,385	
		0,36	0,431	0,412			6...6,5%	12...13%
		0,36	0,432	0,417				
5	9-тиэтажное каркасное здание с панельными стенами / Nine-storeyed frame building with panel walls	0,738	0,863	0,15	0,68 8,5%	0,80 8%	0,765	
6	11-тиэтажное каркасное здание с панельными стенами / Eleven-storeyed frame building with panel walls	0,762	0,971	0,147	0,73 4,5%	0,94 3,5%	0,935	
		0,763	0,973	0,144			18,5%	4%

### Выводы

Фактические значения периодов, полученные для исследуемых зданий, были сопоставлены с соответствующими данными, представленными в действующих нормативных документах «СНРА II-6.02-2006». Было установлено, что фактические значения, полученные для некоторых из исследованных зданий, почти совпадали с нормативными значениями, в то время как для других зданий были получены различия до 13%.

Выявлены особенности совместной работы зданий и грунтов. Для базальтовых грунтов значения преобладающего периода колебаний грунта в трех направлениях

существенно различаются от периодов собственных колебаний зданий, и в спектрах Фурье имеют ярко выраженные преобладающие пики. А в случае дисперсных грунтов в спектре Фурье от микроколебаний грунта есть много пиков с небольшими амплитудами. Значения периодов основного тона колебания таких грунтов совпадают со значениями периодов колебаний зданий в X и Y направлениях, которые можно рассматривать как обратное воздействие на грунт передаваемое от колебаний здания. В этом проявляются особенности совместной работы здания и грунта.

Результаты исследования показывают, что в исследуемых зданиях с каменными несущими стенами, их конструктивная целостность нарушена и не работает как единое целое.

1) Сравнивая фактические значения периодов собственных колебаний здания №1 со значением, полученной в работе [Карапетян, 1967], становится ясно, что в поперечном направлении (X) периоды увеличились только на 3-4,5%, а во 2-й секции – наоборот, уменьшились на 12%; в продольном направлении (Y) периоды увеличились на 11-17%.

2) Периоды собственных колебаний здания №2 увеличились по сравнению со старым общим значением; в поперечном направлении (X) на 8-9% и на 23,5% в 1-й секции, а в продольном направлении (Y) на 14-15%.

3) Периоды собственных колебаний здания №3 увеличились по сравнению со старым общим значением; в поперечном направлении (X) на 16%, а в продольном направлении (Y) на 11%.

4) От результатов наших экспериментов выяснилось, что фактические значения периодов собственных колебаний здания №4 по сравнению со старыми значениям [Хачиян, 2015] возросли в поперечном направлении (X) на 6-7%; в продольном направлении (Y) – на 10,5-11%.

5) Периоды собственных колебаний здания №5 по сравнению с прежними значениями, увеличились на 8-8,5%.

6) Периоды собственных колебаний здания №6 почти равны прежним значениям, только лишь на 3,5-4,5% возросли периоды собственных колебаний.

Значение периодов зданий, которых превосходит более чем на 10% от значения старого измерения, по условиям 6.2.5 пункта ГОСТ 31937-2011, техническое состояние такого здания подлежит обязательному внеплановому обследованию. А те здания, значение периодов которых не превышает 10% от старого измерения, по условиям того же пункта 6.2.5 последующие измерения проводятся через два года.

## Литература

1. Айрапетян О.Ю. Экспериментальное исследование динамических характеристик семиэтажного жилого каркасного здания на основе микросейсмических колебаний. // Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий: Сборник статей VI Всероссийской молодежной геологической конференции. – Уфа: 2018. – С. 189-193.
2. Аносов Г.И., Дробиз М.В., Зиновьев В.Н., Сотников Д.С., Чугаевич В.Я. Исследование сейсмической устойчивости общественно важных зданий города Калининграда. // Казанская наука. – 2010а. – №9. Вып. 2. – С. 561-566.
3. Аносов Г.И., Дробиз М.В., Коновалова О.А., Сотников Д.С., Чугаевич В.Я. Оценка сейсмической устойчивости учебного корпуса №3 Российского государственного университета им. И. Канта с применением методики Накамуры. // Вестник Краунц. Науки о Земле. – 2010б. – Вып. 15 (1). – С. 223-231.



4. Еманов А. Ф., Скларов Л. А. Технология диагностики и мониторинга состояния строительных конструкций на основе исследования микросейсмических колебаний. // О регистрации средства массовой информации: «Предотвращение аварий зданий и сооружений». Алтай-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН. – Новосибирск, 2009. – С. 1-9.
5. Заалишвили В. Б., Кануков А. С., Мельков Д. А. О возможной взаимосвязи изменения гравитационного поля и уровня микросейсмических колебаний с сейсмическими событиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – № 2. – С. 20-26.
6. Капустян Н. К., Климов А. Н., Антоновская Г. Н. Высотные здания: опыт мониторинга и пути его использования при проектировании. // Жилищное строительство. – 2013. – № 11. – С. 6-12.
7. Карапетян Б. К. Колебание сооружений возведенных в Армении. – Ереван: Изд. «Айастан», 1967. – 170 с.
8. Карапетян Дж. К., Айрапетян О. Ю., Мхитарян Д. А. Анализ динамических характеристик здания комплексной конструкции с помощью мобильной сейсмостанции нового поколения. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 1. – С. 110-121. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26792
9. Оганесян С. М. К вопросу о построении новой теории сейсмостойкости. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружения. – 2013. – № 5. – С. 26-29.
10. Савин С. Н., Ситников И. В., Данилов И. Л. Современные методы технической диагностики и мониторинга как средство безопасности строительных конструкций. // В мире неразрушающего контроля. – СПб.: Изд. ООО «Свен», 2008. – С. 14-18.
11. Хачиян Э. Е. Сейсмические воздействия на высотные здания и сооружения. – Ереван: Изд. «Айастан», 1973. – 327 с.
12. Хачиян Э. Е. Сейсмические воздействия и прогноз поведения сооружений. – Ереван: Изд. «Гитутюн» НАН РА, 2015. – 555 с.
13. Ditommaso R., Mucciarelli M., Parolai S., Picozzi M. Monitoring the structural dynamic response of a masonry tower: comparing classical and timefrequency analyses. // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2012. – 23 p. DOI: 10.1007/s10518-012-9347-x.
14. Giacomo D., Gallipoli M. R., Mucciarelli M., Parolai S. and Richwalski S. M. Analysis and Modeling of HVSR in the Presence of a Velocity Inversion: The Case of Venosa, Italy. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2005. – Vol. 95. No. 6. – pp. 2364-2372.
15. Kapustian N., Antonovskaya G., Agafonov V., Neumoin K., Safonov M. Seismic monitoring of linear and rotational oscillations of the multistory buildings in Moscow. // Seismic Behavior of Irregular and Complex Structures. Geotechnical, geological and Earthquake Engineering. – 2013. – Vol. 24. – pp. 353-363.
16. Karapetyan J. K., Gasparyan A. S., Shakhparonyan S. R., Karapetyan R. K. Registration and spectral analysis of waveforms of 10.24.2019 earthquake in the Caucasus using the new IGES-006 seismic sensor. // Russ. J. Earth Sci. – 2020. – Vol. 20. – ES6006. DOI: 10.2205/2020ES000742.
17. Kawase H., Nagashima F., Matsushima S., Sanchez-Sesma F. J. Application of Horizontal-to-Vertical (H/V) Spectral ratios for Both Microtremors and Earthquake Motions Based on The Diffuse Field Theory. // 10<sup>th</sup> U. S. National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering, Anchorage. – 2014.
18. Khachian E. Y. A Method of Determination of Dominant Vibration Periods Values for Nonhomogeneous Multilayer Ground Sites. // Horizon Research Publishing Corporation, USA Universal Journal of Engineering Science. – 2013. – Vol. 2.2. – pp. 47-57.
19. Mucciarelli M., Gallipoli M. R., and Arcieri M. The stability of the horizontal-to-vertical spectral ratio of triggered noise and earthquake recordings. // Bull. Seism. Soc. Am. – 2003. – Vol. 93. – pp. 1407-1412.
20. Nakamura Y. On The H/V Spectrum. // The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17. – Beijing. – 2008.

21. Nakamura Y. Seismic Vulnerability Indices for Ground and Structures Using Microtremor. // World Congress on Railway Research. – Florence: 1997. – pp. 1-7.

22. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A.S., Dzeranov B.V., Shepelev V.D. Application of microseismic and calculational techniques in engineering-geological zonation. // International Journal of Geomate. – 2016. – Vol. 10. No. 19. – pp. 1670-1674.

## References

1. Hayrapetyan H.Yu. Experimental study of dynamic characteristics of a seven-storey residential frame building based on microseismic vibrations. Geology, geocology and resource potential of the Urals and adjacent territories: Collection of articles of the VI All-Russian Youth Geological Conference. Ufa, 2018. pp. 189-193. (in Russ.)

2. Anosov G.I., Drobiz M.V., Zinovjev V.N., Sotnikov D.S., Chugaevich V.Ya. Study of the seismic stability of socially important buildings in the city of Kaliningrad. Kazan Science, 2010a. Vol. 2. No. 9. pp. 561-566. (in Russ.)

3. Anosov G.I., Drobiz M.V., Konovalova O.A., Sotnikov D.S., Chugaevich V.Ya. Evaluation of seismic stability of the educational building No. 3 of the Russian State University named after I. Kant using the Nakamura technique. Bulletin of Kamchatka regional association Educational-Scientific center. Earth Sciences, 2010b. Iss. 15 (1). pp. 223-231. (in Russ.)

4. Emanov A.F., Sklyarov L.A. Technology for diagnostics and monitoring of the state of building structures based on the study of microseismic vibrations. About registration of means of mass information: "Preventing accidents buildings and structures". Altai-Sayan Branch of the Geophysical Survey SB RAS. Novosibirsk, 2009. pp. 1-9. (in Russ.)

5. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Melkov D.A. On the possible interrelation of a change in the gravitational field and microseismic fluctuations level with the seismic events. Geology and Geophysics of Russian South, 2016. No. 2. pp. 20-26. (in Russ.)

6. Kapustyan N.K., Klimov A.N., Antonovskaya G.N. High-rise buildings: monitoring experience and ways of its use in the design. Housing construction, 2013. No. 11. pp. 6-12. (in Russ.)

7. Karapetyan B.K. Vibration of structures erected in Armenia. Yerevan. Publisher "Hayastan", 1967. 170 p. (in Russ.)

8. Karapetyan J.K., Hayrapetyan H.Yu., Mkhitarian D.A. Analysis of the dynamic characteristics of the mixed structure building using mobile seismic station of new generation. Geology and Geophysics of Russian South, 2019. Vol. 9. No. 1. – pp. 110-121. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26792 (in Russ.)

9. Hovhannisyan S.M. On the construction of a new theory of seismic resistance. Earthquake resistant construction. Construction safety. – 2013. – №5. – Pp. 26-29. (in Russ.)

10. Savin S.N., Sitnikov I.V., Danilov I.L. Modern methods of technical diagnostics and monitoring as a means of safety of building structures. V mire nerazrushayushchego kontrolya. SPb. Publisher OOO "Sven", 2008. pp. 14-18. (in Russ.)

11. Khachiyan E.Y. Seismic effects on high-rise buildings and structures. Erevan. Publisher "Hayastan", 1973. 327 p. (in Russ.)

12. Khachiyan E.Y. Seismic effects and prediction of the behavior of structures. Yerevan. Publisher "Gitutyun" NAS RA, 2015. 555 p. (in Russ.)

13. Ditommaso R., Mucciarelli M., Parolai S., Picozzi M. Monitoring the structural dynamic response of a masonry tower: comparing classical and timefrequency analyses. Bulletin of Earthquake Engineering, 2012. 23 p. DOI: 10.1007/s10518-012-9347-x.

14. Giacomo D., Gallipoli M.R., Mucciarelli M., Parolai S. and Richwalski S.M. Analysis and Modeling of HVSR in the Presence of a Velocity Inversion: The Case of Venosa, Italy. Bulletin of the Seismological Society of America, 2005. Vol. 95. No. 6. pp. 2364-2372.

15. Kapustian N., Antonovskaya G., Agafonov V., Neumoin K., Safonov M. Seismic monitoring of linear and rotational oscillations of the multistory buildings in Moscow. Seismic

Behavior of Irregular and Complex Structures. Geotechnical, geological and Earthquake Engineering, 2013. Vol. 24. pp. 353-363.

16. Karapetyan J. K., Gasparyan A. S., Shakhparonyan S. R., Karapetyan R. K. Registration and spectral analysis of waveforms of 10.24.2019 earthquake in the Caucasus using the new IGES-006 seismic sensor. *Russ. J. Earth Sci.*, 2020. Vol. 20. ES6006. DOI: 10.2205/2020ES000742.

17. Kawase H., Nagashima F., Matsushima S., Sanchez-Sesma F. J. Application of Horizontal-to-Vertical (H/V) Spectral ratios for Both Microtremors and Earthquake Motions Based on The Diffuse Field Theory. 10<sup>th</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering, Anchorage, 2014.

18. Khachian E. Y. A Method of Determination of Dominant Vibration Periods Values for Nonhomogeneous Multilayer Ground Sites. Horizon Research Publishing Corporation, USA *Universal Journal of Engineering Science*, 2013. Vol. 2.2. pp. 47-57.

19. Mucciarelli M., Gallipoli M. R., and Arcieri M. The stability of the horizontal-to-vertical spectral ratio of triggered noise and earthquake recordings. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2003. Vol. 93. pp. 1407-1412.

20. Nakamura Y. On The H/V Spectrum. The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17. – Beijing. – 2008.

21. Nakamura Y. Seismic Vulnerability Indices for Ground and Structures Using Microtremor. World Congress on Railway Research. Florence, 1997. pp. 1-7.

22. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Kanukov A. S., Dzeranov B. V., Shepelev V. D. Application of microseismic and calculational techniques in engineering-geological zonation. *International Journal of Geomate*, 2016. Vol. 10. Vol. 19. pp. 1670-1674.

---

---

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА  
ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

---

---

УДК 550.814:669.21

DOI: [10.46698/VNC.2021.99.14.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.99.14.010)

Оригинальная статья

Комплексная оценка параметров  
и закономерностей распределения  
благородных металлов влияющих  
на их продуктивность

И. И. Босиков <sup>1</sup>, Р. В. Ключев <sup>2</sup>, К. В. Темиров <sup>3</sup>, А. И. Мазко <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Россия, 362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44;

<sup>2</sup>Московский политехнический университет, Россия, 107203, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38, e-mail: [kluev-roman@rambler.ru](mailto:kluev-roman@rambler.ru);

<sup>3</sup>Управление по обеспечению реализации национальных проектов в Республике Северная Осетия-Алания (Проектный офис РСО-Алания), Россия, 362040, РСО-Алания, г. Владикавказ, пл. Ленина, д. 2

Статья поступила: 06.08.2021, доработана: 21.08.2021, принята к публикации: 03.09.2021

**Резюме: Актуальность работы.** За последние десятилетия, начиная с шестидесятых годов двадцатого века, производство благородных металлов неуклонно возрастает на 12% в год. Причём, спрос опережает предложение. Это связано отчасти с тем, что благородные металлы являются эквивалентом стоимости человеческого труда, а с другой стороны возрастает их промышленное использование, основанное на свойствах элементов этой группы металлов. **Цель исследований:** провести анализ и комплексную оценку параметров и закономерностей распределения благородных металлов (БМ) влияющих на их продуктивность. **Методика исследований.** Проводился минералого-петрографический анализ шлихов из скважин, пробирный анализ золота из разведочных скважин, фациальный и формационный анализ, гранулометрический анализ. **Результаты исследований.** Крупность золота в коренных месторождениях оказывает прямое и решающее влияние на продуктивность образованных ими россыпей: чем мельче золото, тем ниже продуктивность. Объясняется это, тем что, мелкие и субмикроскопические зерна золота обладают большой миграционной способностью в водно-аллювиальной среде, такое золото не будет образовывать крупных россыпных месторождений. По результатам пробирных анализов золота из разведочных скважин, средняя шлиховая пробность металла в пределах площади данного подсчета запасов составляет 890,1‰ и колеблется в основном в диапазоне 889-898, в одном случае понижается до 840 (линия 24). Лигатурная пробность меняется незначительно, в пределах 900-923 и в среднем равна 910,4‰. Приведенные данные согласуются с результатами аффинажа золота, добытого в 2002 г. на прилегающем участке месторождения. По итогам аффинажных работ, выполнявшихся в 2002 г. на аффинажном заводе, шлиховая пробность на отработанном Восточном участке исследуемой россыпи составила в среднем 893,7‰, лигатурная – 908,7‰.

**Ключевые слова:** россыпь, фракция, россыпеобразующие формации, крупность золота, гранулометрический состав, аффинаж, пробность, шлик.

**Для цитирования:** Босиков И. И., Ключев Р. В., Темиров К. В., Мазко А. И. Комплексная оценка параметров и закономерностей распределения благородных металлов влияющих на их продуктивность. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (3): 115 – 128. DOI: [10.46698/VNC.2021.99.14.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.99.14.010).

---

---

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION  
OF SOLID MINERALS, MINERAGENY



---

---

DOI: [10.46698/VNC.2021.99.14.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.99.14.010)

Original paper

## Comprehensive assessment of parameters and regularities of the distribution of precious metals affecting their productivity

I. I. Bosikov <sup>1</sup>, R. V. Klyuev <sup>2</sup>, K. V. Temirov <sup>3</sup>, A. I. Mazko <sup>1</sup>

<sup>1</sup>North Caucasian institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), 44 Nikolaeva Str., Vladikavkaz 362021, Russian Federation;

<sup>2</sup>Moscow Polytechnic University, 38 Bolshaya Semenovskaya Str., Moscow 107203, Russian Federation, e-mail: [kluev-roman@rambler.ru](mailto:kluev-roman@rambler.ru);

<sup>3</sup>Department for ensuring the implementation of national projects in the Republic of North Ossetia-Alania (Project Office of the Republic of North Ossetia-Alania), 2 Lenina Square, Vladikavkaz 362040, Russian Federation

*Received: 06.08.2021, revised: 21.08.2021, accepted: 03.09.2021*

**Abstract: Relevance.** Over the past decades, since the sixties of the twentieth century, the production of precious metals has steadily increased by 12% per year. Moreover, demand outstrips supply. This is partly due to the fact that noble metals are the equivalent of the value of human labor, and on the other hand, their industrial use is increasing, based on the properties of elements of this group of metals. **Aim.** To analyze and comprehensively assess the parameters and patterns of distribution of noble metals (NM) affecting their productivity. **Methods.** Mineralogical and petrographic analysis of concentrates from wells, assay analysis of gold from exploration wells, facies and formation analysis, and particle size analysis were carried out. **Results.** The size of gold in primary deposits has a direct and decisive influence on the productivity of placers formed by them: the finer the gold, the lower the productivity. This is explained by the fact that small and submicroscopic gold grains have a high migration capacity in the water-alluvial environment, such gold will not form large alluvial deposits. According to the results of assay analyzes of gold from exploration wells, the average placer fineness of the metal within the area of this reserve calculation is 890.1‰ and fluctuates mainly in the range of 889-898, in one case it decreases to 840 (line 24). The ligature fineness varies insignificantly, within 900-923 and is on average 910.4‰. These data are consistent with the results of the refining of gold mined in 2002 in the adjacent area of the deposit. According to the results of the refining works carried out in 2002 at the refinery, the placer fineness in the worked out Vostochny area of the studied placer averaged 893.7‰, the ligature fineness – 908.7‰.

**Keywords:** placer, fraction, placer-forming formations, gold size, granulometric composition, refining, fineness, concentrate.

**For citation:** Bosikov I. I., Klyuev R. V., Temirov K. V., Mazko A. I. Comprehensive assessment of parameters and regularities of the distribution of precious metals affecting their productivity. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (3): 115 – 128. DOI: [10.46698/VNC.2021.99.14.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.99.14.010).

### Введение

Исследования проводились на золотоносном россыпном месторождении [Некрасов, 2018]. Для наблюдения изменения размеров и характера распределения золотой фракции были использованы материалы ранее проводимых работ на участке [Босиков и др., 2021а, б; Ключев и др., 2020].

**Крупность золота.** Данный показатель является наиболее важным и предопределяет продуктивность россыпеобразующих формаций [Некрасов, 2019]. К сожалению, точные количественные характеристики крупности золота из различных типов руд до сих пор отсутствуют, что объясняется несовершенством, сложностью и высокой стоимостью методов определения гранулометрического состава золота в рудах [Федорова, и др., 2018; Литвиненко, 2018; Шарафелдин, 2018; Nassani et al., 2021; Голик и др., 2020; Чотчаев и др., 2021]. Это обстоятельство заставило проводить сравнительное изучение крупности золота в различных рудах путем анализа отдельных фракций измельченной руды [Song et al., 2017; Tyulenev et al., 2016, 2018; Zhukovskiy et al., 2019]. Такой подход оправдан, поскольку размер обломков указывает на относительный размер находящихся в них золотинок, а ошибка, особенно в мелких классах, более или менее постоянна для всех типов руд [Ganapathy et al., 2020; Sebutsoe et al., 2017; Sinclair et al., 2015].

Крупность золота в коренных месторождениях оказывает прямое и решающее влияние на продуктивность образованных ими россыпей: чем мельче золото, тем ниже продуктивность. Объясняется это, тем что, мелкие и субмикроскопические зерна золота обладают большой миграционной способностью в водно-аллювиальной среде, такое золото не будет образовывать крупных россыпных месторождений.

### Методы исследований

При проведении исследований были применены: минералого-петрографический анализ шлихов из скважин; пробирный анализ золота из разведочных скважин; фациальный и формационный анализ; гранулометрический анализ.

### Характеристика золота на россыпном месторождении

По данным минералогического изучения шлихов из скважин, все участки россыпного месторождения характеризуются практически однотипным золотом – около 90-95% золота представлено утолщенными пластинками удлиненной, реже округлой формы с плавноизвилистыми, иногда с заливообразными, зазубренными и щелевидными очертаниями боковых сторон (рис. 1).

От 5 до 10% золота представлено зернами удлиненно-комковидной, округлой, реже палочкообразной формы с неровной поверхностью (рис. 2, 3). Наблюдается увеличение количества золотинок в виде зерен во фракциях менее 0,5 мм.

Цвет золота желтый и насыщенно желтый, в некоторых выделениях отмечается слабый зеленоватый оттенок.



Рис. 1. Разновидности форм самородного золота /  
Fig. 1. Varieties of forms of native gold

Таблица 1 / Table 1

**Характеристика гранулометрического состава и пробыности золота изучаемой россыпи по данным скважин /**

**Characteristics of the granulometric composition and fineness of gold in the studied placer according to well data**

№№ буровых линий / №№ of line drilling	№№ скважин / №№ of wells	Гранулометрический состав золота (в %) по классам и фракциям крупности (мм) / Grain-size composition of gold (in %) according to classes and size division (mm)								Сред. крупность, мм / Average grain size	Пробность / Fineness		
		Тонкое / Fine		Весьма мелкое / Very small		Мелкое / Small		Среднее / Average			Крупное / Coarse	Шлиховая / Placer	Лигатурная / Base
		-0,15	+0,15	+0,25	+0,5	+1,0	+2,0	+3,0	+4,0				
6	5-15	1,9	3,5	18,2	27,5	48,9	0,0	0,0	0,0	0,98	897	914	
		1,9	21,7		76,4		0		0				
8	6-20	0,8	5,9	10,4	35,5	47,3	0,0	0,0	0,0	0,95	886	911	
		0,8	16,3		82,8		0		0				
10	2-16	1,1	2,0	9,9	33,6	40,3	13,1	0,0	0,0	1,08	899	903	
		1,1	11,9		73,9		0		0				
11	1-15	0,2	8,8	16,0	20,8	22,0	18,3	13,9	0,0	1,19	893	914	
		0,2	24,8		42,8		32,2		0				
12	7-17	1,2	3,2	10,8	24,7	25,3	15,1	19,7	0,0	1,40	896	900	
		1,2	14,0		50,0		34,8		0				
13	1-16	0,7	2,7	6,9	21,0	19,8	20,8	11,9	16,2	1,95	890	908	
		0,7	9,6		40,8		32,7		16,2				
14	1-15	2,7	1,5	14,9	23,1	12,8	32,8	12,2	0,0	1,61	898	906	
		2,7	16,4		35,9		45,0		0				
15	5-19	1,0	4,7	10,4	25,1	22,8	11,9	24,1	0,0	1,39	889	902	
		1,0	15,1		47,9		36,0		0				
18	1-20	3,5	2,5	9,8	28,2	25,7	20,5	9,8	0,0	1,23	897	915	
		3,5	12,4		53,9		30,3		0				
20	0-14	0,6	2,2	7,9	22,7	21,3	30,0	15,3	0,0	1,78	890	906	
		0,6	10,1		44,0		45,3		0				
22	3-16	1,0	3,3	9,3	33,7	43,4	9,3	0,0	0,0	1,06	892	923	
		1,0	12,6		77,1		9,3						
24	2-17	0,9	4,2	11,9	20,7	16,5	20,8	10,9	14,1	1,75	840	922	
		0,9	16,1		37,2		31,7		14,1				
25	0-14	0,3	2,4	15,7	19,5	18,5	17,2	13,5	12,8	1,65	898	910	
		0,3	18,1		38,0		30,7		12,8				
26	0-15	1,3	3,5	11,3	26,5	15,2	26,6	15,6	0,0	1,49	897	912	
		1,3	14,8		41,7		42,2		0				
Средние / Average		1,1	3,5	11,3	25,1	25,3	18,0	11,2	4,5	1,36	890,1	910,4	
		1,1	14,8		50,4		29,2		4,5				



Рис. 2. Палочкообразная и округлая форма /  
Fig. 2. Rod-shaped and rounded shape



Рис. 3. Комковатая форма /  
Fig. 3. Lumpy shape

Окатанность золота в основном средняя (70-80%), реже хорошая (20-30%). Гранулометрический состав и пробность золота из скважин приведены в таблице 1.

#### Результаты работы и их обсуждение.

Крупность золота в коренных месторождениях оказывает прямое и решающее влияние на продуктивность образованных ими россыпей: чем мельче золото, тем ниже продуктивность. Объясняется это, тем что, мелкие и субмикроскопические зерна золота обладают большой миграционной способностью в водно-аллювиальной среде, такое золото не будет образовывать крупных россыпных месторождений.

Согласно приведенной таблице, в разведанной части россыпи резко преобладает золото мелкой (50,4%) и средней (29,2%) фракций (рис. 4). Характерно также повышенное содержание весьма мелкой фракции (14,8%). Количество тонкого и крупного золота невелико (соответственно 1,1 и 4,5%).

Крупность золота по линиям меняется от 0,95-1,08 мм (линии 6, 8, 10, 22) до 1,65-1,95 мм (линии 13, 20, 24, 25). В целом, крупность металла (рис. 5) возрастает на участках с более высокими значениями содержания и линейного запаса золота и заметно снижается к хвостовой части россыпи. Средний размер выделений золота, подсчитанный по формуле Островского, составляет 1,36 мм.



Рис. 4. Мелкая и средняя фракции / Рис. 5. Крупная фракция /  
Fig. 4. Small and medium fractions Fig. 5. Large fraction



Таблица 2 / Table 2

**Характеристика распределения фракций крупности золота в продольном направлении россыпи по разведочным линиям скважин /**

**Characteristics of the distribution of fractions of the size of gold in the longitudinal direction of the placer along the exploration lines of wells**

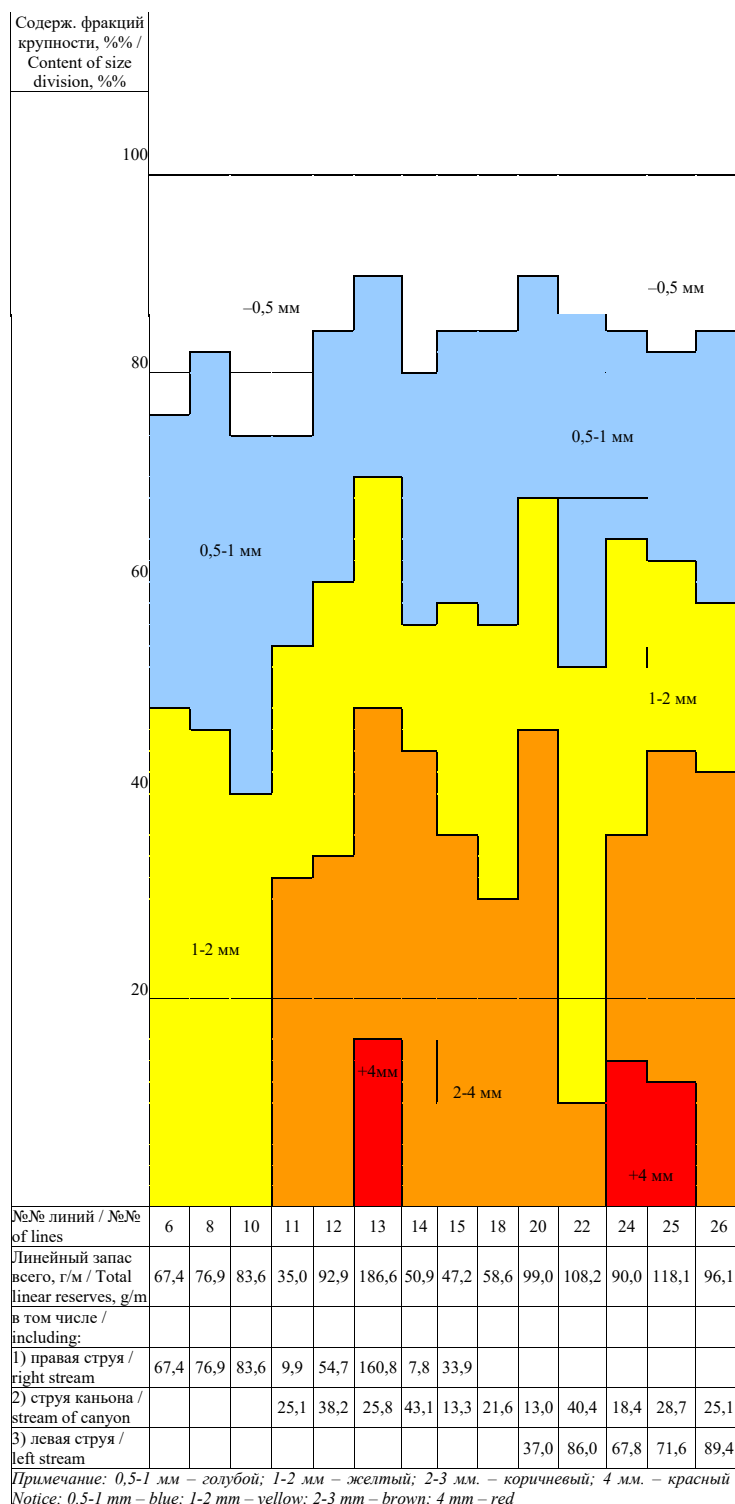
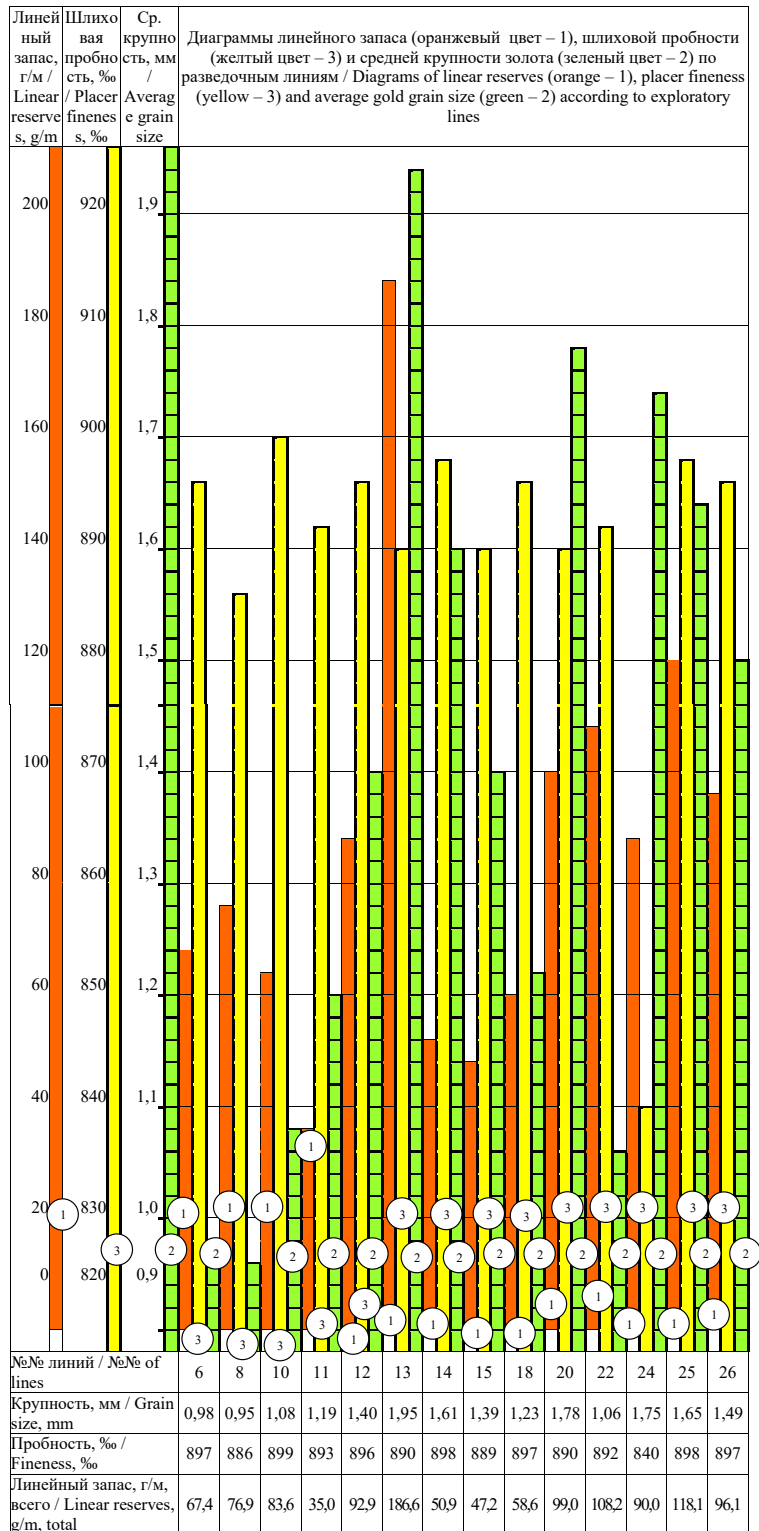


Таблица 3 / Table 3

**Сравнительная характеристика распределения линейных запасов, средней крупности и пробыности золота россыпи по разведочным линиям скважин /**

**Comparative characteristics of the distribution of linear reserves, average size and fineness of placer gold along exploration lines of wells**



Характеристика распределения фракций крупности золота в продольном направлении россыпи приведена в таблице 2.

По результатам пробирных анализов золота из разведочных скважин, средняя шлиховая пробность металла в пределах площади данного подсчета запасов составляет 890,1‰ и колеблется в основном в диапазоне 889-898, в одном случае понижается до 840 (линия 24). Лигатурная пробность меняется незначительно, в пределах 900-923 и в среднем равна 910,4‰.

Приведенные данные согласуются с результатами аффинажа золота, добытого в 2002 г. на прилегающем участке месторождения. По итогам аффинажных работ, выполнявшихся в 2002 г. на аффинажном заводе, шлиховая пробность на отработанном Восточном участке исследуемой россыпи составила в среднем 893,7‰, лигатурная – 908,7‰.

Главной лигатурной примесью в самородном золоте является серебро (ценный попутный компонент III группы); весовое отношение Au / Ag составляет 1/0,095.

Сравнительная характеристика распределения линейных запасов, средней крупности и пробности золота по разведочным линиям приведена в таблице 3.

**Минералого-петрографический анализ. Минеральный состав россыпи** – золото, серебро, пирит, лимонит, магнетит, гранат, кварц.

**Золото Au (рис. 6).** Один из самых высокоотражающих минералов; цвет насыщенный желтый (р 48%); внутренних рефлексов нет, но в скрещенных николях отчетливо видны все царапины. В контакте с выделениями золота больших размеров пирит и галенит имеют серый оттенок, а халькопирит выглядит серо-зеленоватым. Золото видимое отмечается повсеместно в местах его повышенного содержания во всех эксплуатируемых жилах. Форма крупных золотин самая различная [Augustin et al., 2018; Luo et al., 2018]. Это пористые изометричные, палочкообразные, неправильной формы зерна, включенные в кварц или располагающиеся по контактам рудных минералов. И преобладающие величины видимых золотин составляют доли мм, максимальные – 2-3 мм. Реже встречаются скопления золотин неправильной формы в кварце и в контактах пирита и тетрадимита с кварцем. В аншлифах самородное золото наблюдается часто, обычно в сростании с тетрадимитом, пиротином, галенитом, халькопиритом, блеклой рудой, а также в виде изометричных включений на границах зерен кварца и рудных минералов. Размер золотин от 0,005 мм до 0,1 мм. Формы различны: палочки длиной 0,3-0,4 мм или пластинки в хлорите по спайности, иногда цемент дробленных зерен арсенопирита или просто

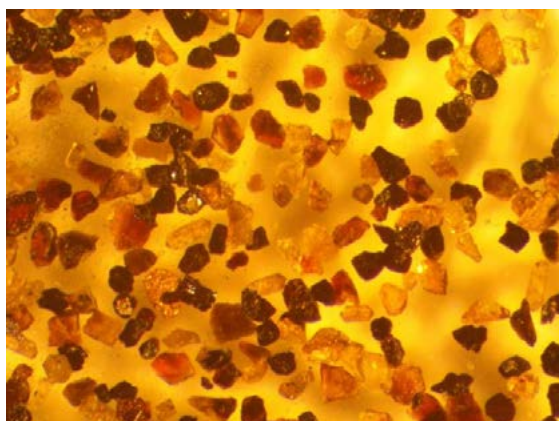


Рис. 6. Золото в шлихе обций /  
Fig. 6. Gold in concentrate common

изометричные выделения в халькопирите и блеклой руде.

Золото в единичных зернах встречается в шлихах сравнительно часто в областях развития гранитоидов. Вблизи от коренных источников оно имеет деидритовидную, губчатую, почковидную, пластинчатую форму. При небольшом переносе зерна становятся округлыми, расплюснутыми или скрученными, с мелкобугорчатой поверхностью. Повышенную миграционную способность «имеет «носовое» золото



Рис. 7. Серебро /  
Fig. 7. Silver

– листочки или чешуйки округлой формы, нередко выпукло-вогнутые, размером менее 1 мм в поперечнике. Очень мелкие зерна (менее 0,1 мм) могут быть и изометричными.

**Серебро Ag (рис. 7).** Содержит примеси Au, Cu, Sb. Сингония кубическая. Неправильные древовидные или пластинчатые зёрна, сплюснутые чешуйки. Поверхность зёрен неровная, ямчатая, иногда покрыта чёрным налетом. Цвет серебряно-белый, серый, блеск металлический. Спайность отсутствует, излом крючковатый. Ковкое и тягучее. Плотность 10,1-11,1, твёрдость 2,5-3.

Правильные кристаллы редки. Характерны дендриты, проволочные

и волокнистые формы. Часто бывает зернистое до тонконитевидного, также в виде пластинок или сплюснутых чешуек. Уд. вес 10-11. Весьма ковко и тягуче. Непрозрачно. Под микроскопом в отраженном свете кремово-белое с сильным блеском. Полируется хорошо. Изотропно. С  $\text{HNO}_3$  вскипает. После травления этой кислотой поверхность становится шероховатой; от  $\text{HCl}$  оно слегка тускнеет.

В россыпях обычно неустойчиво и переходит в серебряный блеск или кераргирит. При дроблении расплющивается в неправильные пластинки и чешуйки с крючковатым изломом.

Самородное серебро состоит из неправильной формы зерен, пластинок, чешуек, иногда проволочной или нитевидной.

**Магнетит  $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  (рис. 8).** Минерал магнитной фракции. Его октаэдрические кристаллы имеют острые ребра, ступенчатые фигуры роста на гранях, иногда скелетные формы. Обычно представляет собой изометричные зерна, остроугольные обломки. Хорошо окатанные зерна магнетита, особенно мелкие, редки.

В магнитной фракции присутствуют неполные псевдоморфозы гематита по магнетиту (мартит), оолиты и стяжения красного железняка, частично или полностью восстановившиеся до магнетита. Цвет магнетита черный, на поверхности появляются пленки бурого цвета. Раздавливается минерал с трудом, излом неровный, порошок черный. В самой фракции зерна магнетита также стягиваются в цепочки, агрегируются, притягиваются друг к другу и к стальной игле.

**Пирит  $\text{FeS}_2$  (рис. 9).** Наиболее, распространенный в шлихах сульфид, часто встречающийся в виде

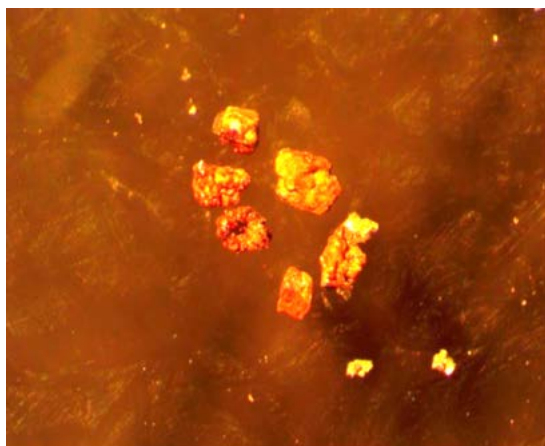


Рис. 8. Магнетит /  
Fig. 8. Magnetite

кристаллов, их обломков или срастаний, реже он образует остроугольные зерна.

В некоторых кварцево-золотоносных жилах октаэдры пирита приурочены к верхним частям жильных тел. При окислении пирит покрывается черными, коричневыми или бурыми пленками оксидов и гидроокислов железа. Такой пирит внешне похож на перовскит, темноокрашенный рутил.

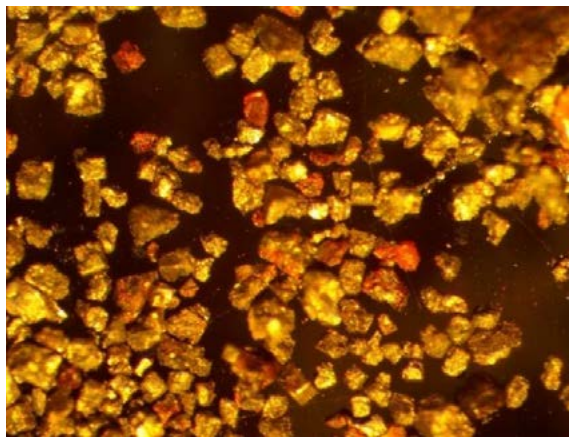
**Лимонит  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (рис. 10).** Как смесь гидроокислов железа, среди которых преобладает гидрогетит, морфологически очень разнообразен. Он образует округлые зерна, стяжения, оолиты, встречается в виде землистых масс и чечевицеобразных скоплений, нередко представляющих собой остатки колоний отмерших железобактерий. Лимонит присутствует в шлихах в виде псевдоморфоз по пириту, сидериту, магнетиту.



*Рис. 10. Лимонит, зерна золота /  
Fig. 10. Limonite, grains of gold*

ромбоэдрической головкой с одной стороны, реже с двух. Чаще встречаются удлиненные «обелисковидные» кристаллы, помимо них есть уплощенные кварцевые кристаллы. На гранях призмы наблюдается характерная поперечная штриховка. Кристаллы имеют стеклянный блеск, преимущественно прозрачные.

Различной окраски – бесцветные, дымчатые, практически черные и молочно белые. Разновидности кварца на участке: горный хрусталь – бесцветного прозрачного цвета, встречается часто, средний размер кристаллов 1,5 см, раухтопаз – дымчатый кварц, светло-серого цвета. В россыпи представлен обломками размерами от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров.



*Рис. 9. Пирит  $\text{FeS}_2$  /  
Fig. 9. Pyrite  $\text{FeS}_2$*

Он образует округлые зерна, стяжения, оолиты, встречается в виде землистых масс и чечевицеобразных скоплений, нередко представляющих собой остатки колоний отмерших железобактерий. Лимонит присутствует в шлихах в виде псевдоморфоз по пириту, сидериту, магнетиту.

В зависимости от минерального состава и агрегатного состояния цвет лимонита меняется от охряно-желтого и бурого до темно-коричневого, почти черного.

**Кварц  $\text{SiO}_2$  (рис. 11).** Кварц в россыпях встречается в виде обломков различной формы и размеров, гальки, песка, кристаллов. Кристаллы – гексагональной призмы, увенчанные шестигранной



*Рис. 11. Золотой сросток с кварцем /  
Fig. 11. Gold splice with quartz*



Рис. 12. Гранат  $Fe_3Al_2 [SiO_4]_3$  /  
Fig. 12. Garnet  $Fe_3Al_2 [SiO_4]_3$

Хорошо виден раковистый излом, кремь – тонкозернистый скрытокристаллический агрегат. Был обнаружен на поверхности коры выветривания в виде гальки. Размеры 75 см. Внешне окрашен в коричневые цвета, внутри темнее – темно-серый.

**Гранат  $Fe_3Al_2 [SiO_4]_3$  (рис. 12).** Особенно близок по составу к алмадину, встречается во многих шлихах, особенно в областях развития метаморфических толщ и распространения ледниковых отложений.

Гранат встречается в виде изометричных кристаллов, угловатых обломков с неровными изломом и, реже, корродированных или окатанных зерен с шероховатой поверхностью. Кристаллы и угловатые зерна гранатов, преимущественно алмадина, узнаются без затруднений. Окатанные зерна похожи на циркон, у которого высокое двупреломление.

### Выводы

По приведенным выше таблицам (2 и 3) можно сказать, что никакой закономерности распределения по крупности либо пробности металла на россыпном месторождении нет. А судя по характеристикам данное месторождение является весьма продуктивным.

По результатам пробирных анализов золота из разведочных скважин, средняя шлиховая пробность металла в пределах площади данного подсчета запасов составляет 890,1‰ и колеблется в основном в диапазоне 889-898, в одном случае понижается до 840 (линия 24). Лигатурная пробность меняется незначительно, в пределах 900-923 и в среднем равна 910,4‰.

Приведенные данные согласуются с результатами аффинажа золота, добытого в 2009 г. на прилегающем участке месторождения. По итогам аффинажных работ, выполнявшихся в 2019 г. на аффинажном заводе, шлиховая пробность на отработанном Восточном участке россыпи составила в среднем 893,7‰, лигатурная – 908,7‰.

Главной лигатурной примесью в самородном золоте является серебро (ценный попутный компонент III группы); весовое отношение Au/Ag составляет 1/0,095.

### Литература

1. Босиков И. И., Клюев Р. В., Гаврина О. А. Анализ геолого-геофизических материалов и качественная оценка перспектив нефтегазоносности Южно-Харьбинского участка (Северный Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2021а. – № 11 (1). – С. 6-21. DOI: 10.46698/VNC.2021.36.47.001.
2. Босиков И. И., Клюев Р. В., Хетагуров В. Н., Ажмухамедов И. М. Разработка методов и средств управления аэрогазодинамическими процессами на добычных участках. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021б. – № 1. – С. 77-83. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83.

3. Голик В. И., Бурдзиева О. Г., Дзеранов Б. В. Управление геодинамикой массива путем регулирования величины напряжений. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2020. – № 10 (2). – С. 147-160. DOI: 10.46698/VNC.2020.93.21.011.
4. Клюев Р. В., Босиков И. И., Майер А. В., Гаврина О. А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы. // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2020. – № 2. – С. 283-290. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290.
5. Литвиненко И. С. О коренных источниках россыпей юглеровского рудно-россыпного поля (Северо-Восток России). // *Разведка и охрана недр*. – 2018. – № 6. – С. 3-10.
6. Некрасов Е. М. Локализация руд золота в разломах разных типов. // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. – 2019. – № 6. – С. 33-43.
7. Некрасов Е. М. Поиск «слепых» золоторудных тел жильного типа. // *Руды и металлы*. – 2018. – № 3. – С. 55-71. DOI: 10.24411/0869-5997-2018-10007.
8. Федорова Л. Л., Куляндин Г. А. Опыт применения метода георадиолокации при эксплуатационной разведке россыпных месторождений золота Якутии. // *Успехи современного естествознания*. – 2018. – № 11. – С. 160-165.
9. Чотчаев Х. О., Бурдзиева О. Г., Заалишвили В. Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021. – № 11 (1) – С. 81-94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007.
10. Шарафелдин Х. Э. Позднеорогенные месторождения золота Египта. // *Горные науки и технологии*. – 2018. – № 1. – С. 89-96. DOI: 10.17073/2500-0632-2018-1-89-96.
11. Augustin J., Gaboury D. Multi-stage and multi-sourced fluid and gold in the formation of orogenic gold deposits in the world-class Mana district of Burkina Faso – Revealed by LA-ICP-MS analysis of pyrites and arsenopyrites. // *Ore Geology Reviews*. – 2018. – Vol. 104. – pp. 495-521. DOI: 0.1016/j. oregeorev. 2018.11.011.
12. Ganapathy G. P., Zaalishvili V. B., Chandrasekaran S. S., Melkov, D. A. Integrated monitoring of slope process in India and Russia. // *Sustainable Development of Mountain Territories*. – 2020. – No. 12 (4). – pp. 572-581. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-572-581.
13. Luo D., Zeng G. Application and effects of singularity analysis in evaluating the denudation degree of Carlin-type gold deposits in southwest Guizhou, China. // *Ore Geology Reviews* – 2018. – Vol. 96. – pp. 164-180. DOI: 10.1016/j. oregeorev. 2018.04.018.
14. Nassani A. A., Aldakhil A. M., Zaman K. Ecological footprints jeopardy for mineral resource extraction: Efficient use of energy, financial development and insurance services to conserve natural resources // *Resources Policy*. – 2021. – Vol. 74. – №. 102271. DOI: 10.1016/j. resourpol. 2021.102271.
15. Sebutsoe T. C., Musingwini C. Characterizing a mining production system for decision-making purposes in a platinum mine. // *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2017. – Vol. 117. – pp. 199-206.
16. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. // *Hydrometallurgy*. – 2015. – Vol. 157. – pp. 306-324. DOI: 10.1016/j. hydromet. 2015.08.022.
17. Song X., Pettersen J. B., Pedersen K. B., Roberg S. Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copper mine: A case study in Northern Norway. // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 16415. – pp. 892-904.
18. Tyulenev M. A., Zhironkin S. A., Garina E. A. The method of coal losses reducing at mining by shovels. // *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. – 2016. – No. 7 (4). – pp. 363-370. DOI: 10.1504/IJMME. 2016.079990.
19. Tyulenev M. A., Markov S. O., Gasanov M. A., Zhironkin S. A. Numerical Modeling in the Structural Study of Technogenic Rock Array. // *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2018. – No. 36 (5). – pp. 2789-2797. DOI: 10.1007/s10706-018-0501-3.

20. Zhukovskiy Y., Batueva D., Buldysko A., Shabalov M. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform. // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2019. – No. 1333 (6). DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033.

## References

1. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Gavrina O. A. Analysis of geological-geophysical materials and qualitative assessment of the oil and gas perspectives of the Yuzhno-Kharbizhinsky area (Northern Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*, 2021a. No. 11 (1). pp. 6-21. DOI:10.46698/VNC.2021.36.47.001. (In Russ.)
2. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Khetagurov V. N., Azhmukhamedov I. M. Development of methods and management tools aerogas dynamics processes at mining sites. *Sustainable development of mountain territories*, 2021b. No. 1. pp. 77-83. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83. (In Russ.)
3. Golik V. I., Burdzieva O. G., Dzeranov B. V. Ground geodynamics control by regulating stress level. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2020. No. 10 (2). pp. 147-160. DOI: 10.46698/VNC.2020.93.21.011. (in Russ.)
4. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Mayer A. V., Gavrina O. A. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2020. No. 2. pp. 283-290. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290. (In Russ.)
5. Litvinenko I. S. Lode sources of placer deposits in yugler mineral area, North-east Russia. *Exploration and protection of mineral resources*, 2018. No. 6. pp. 3-10. (In Russ.)
6. Nekrasov E. M. Localisation of gold ores in faults of different types. *Proceedings of higher educational institutions. Geology and exploration*, 2019, No. 1. pp. 33-43. (In Russ.)
7. Nekrasov E. M. Prospecting for lode-type blind gold orebodies. *Ores and Metals*, 2018. No. 3. pp. 55-71. DOI: 10.24411/0869-5997-2018-10007. (In Russ.)
8. Fedorova L. L., Kulyandin G. A. Experience in applying the GPR method in the exploration of placer gold deposits of Yakutia. *Advances in modern natural science*, 2018. No. 11. pp. 160-165. (In Russ.)
9. Chotchaev Kh. O., Burdzieva O. G., Zaalishvili V. B. Zoning of high mountainous areas by geoecological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2021. No. 11 (1). pp. 81-94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007. (In Russ.)
10. Sharafeldin H. E. Late-orogenic gold deposits of Egypt. *Gornye nauki i tehnologii. Mining science and technology*, 2018. Vol. 1, pp. 89-96. DOI: 10.17073/2500-0632-2018-1-89-96.
11. Augustin J., Gaboury D. Multi-stage and multi-sourced fluid and gold in the formation of orogenic gold deposits in the world-class Mana district of Burkina Faso – Revealed by LA-ICP-MS analysis of pyrites and arsenopyrites. *Ore Geology Reviews*, 2018. Vol. 104. pp. 495-521. DOI: 0.1016/j.oregeorev.2018.11.011.
12. Ganapathy G. P., Zaalishvili V. B., Chandrasekaran S. S., Melkov, D. A. Integrated monitoring of slope process in India and Russia. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2020. No. 12 (4). pp. 572-581. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-572-581.
13. Luo D., Zeng G. Application and effects of singularity analysis in evaluating the denudation degree of Carlin-type gold deposits in southwest Guizhou, China. *Ore Geology Reviews*, 2018. Vol. 96. pp. 164-180. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.04.018.
14. Nassani A. A., Aldakhil A. M., Zaman K. Ecological footprints jeopardy for mineral resource extraction: Efficient use of energy, financial development and insurance services to conserve natural resources. *Resources Policy*, 2021. Vol. 74. №. 102271. DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102271.
15. Sebutsoe T. C., Musingwini C. Characterizing a mining production system for decision-making purposes in a platinum mine. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2017. Vol. 117. pp. 199-206.



16. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*, 2015. Vol. 157. pp. 306-324. DOI: 10.1016/j. hydromet. 2015.08.022.
17. Song X., Pettersen J.B., Pedersen K.B., Roberg S. Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copperore mine: A case study in Northern Norway. *Journal of Cleaner Production*, 2017. Vol. 16415. pp. 892-904.
18. Tyulenev M.A., Zhironkin S.A., Garina E.A. The method of coal losses reducing at mining by shovels. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 2016. №7 (4). pp. 363-370. DOI: 10.1504/IJMME. 2016.079990.
19. Tyulenev M.A., Markov S.O., Gasanov M.A., Zhironkin, S.A. Numerical Modeling in the Structural Study of Technogenic Rock Array. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2018. №36 (5). pp. 2789-2797. DOI: 10.1007/s10706-018-0501-3.
20. Zhukovskiy Y., Batueva D., Buldysko A., Shabalov M. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019. No. 333 (6). DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033.

---

---

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА  
ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

---

---

УДК 553.411.462.43

DOI: [10.46698/VNC.2021.73.74.011](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.73.74.011)

Оригинальная статья

## Рудно-магматические системы медно-порфиорового типа Большого Кавказа

С. Г. Парада 

Геофизический институт Владикавказского научного центра  
Российской академии наук, Россия, 362002, PCO-Алания, г. Владикавказ,  
ул. Маркова, 93а, e-mail: segripa@rambler.ru

Статья поступила: 29.07.2021, после рецензирования: 24.08.2021, принята к публикации: 07.09.2021

**Резюме:** Статья посвящена выявлению особенностей геологического строения и минерагении Танадон-Сангутидон-Казбекского района проявлений медно-порфиоровых минерализаций Центральной части Большого Кавказа и оценке соответствия геологических обстановок оруденения современным моделям рудно-магматических систем медно-порфиорового типа. **Актуальность работы** определяется необходимостью разработки научно-методической основы прогнозирования и поисков скрытого оруденения. **Цель исследования.** Выявить особенности геологии и минерагении Танадон-Сангутидон-Казбекского рудного района и установить соответствие обстановок оруденения современным моделям рудно-магматических систем медно-порфиорового типа. **Методы.** Сравнительно-геологический и металлогенический анализ на основе современных геоинформационных технологий в среде программного комплекса ArcGIS. **Результаты.** Установлено, что рудно-магматические системы исследуемого района соответствуют геологоструктурной позиции медно-порфиоровых месторождений. Изученный район объединяет группу медно-порфиоровых рудно-магматических систем, связанных с малыми гранитоидными интрузиями теплинского плиоцен-плейстоценового комплекса. Здесь также отмечаются рудопроявления вольфрама, мышьяка, золота, сурьмы и др., составляющие единый генетический ряд, в котором медно-порфиоровое оруденение занимает вполне определенную позицию, – приурочено к порфиоровой фазе новейшего интрузивного магматизма. Сопоставление обстановок проявления позднекайнозойского оруденения и его характеристик в пределах изученных рудоносных площадей с основными элементами типовой модели медно-порфиоровой системы позволяет рассматривать Сангутидонский, Теплинский и Танадонский рудные узлы как выражение надстраивающих друг друга по вертикали частей единой рудно-магматической системы медно-порфиорового типа. Продуктивная на медно-порфиоровое оруденение новейшая гранит-гранодиоритовая формация Большого Кавказа образовалась в условиях повторноорогенного режима активизации региона и наложена на его гетерогенный субстрат. Последний в пределах изучаемого района характеризуется двухэтажным строением и состоит из нижне-среднеюрского вулканогенно-осадочного комплекса чехла и доюрского основания, в котором главную роль играют докембрий – нижне-среднепалеозойские метаморфические толщи кристаллического фундамента Большого Кавказа, прорванные палеозойскими гранитоидами Главного хребта. Состав позднеэоценовых гранитоидов находится в зависимости от состава субстрата, как на глубинных уровнях его анатектического плавления, так и на путях подъема образованных при этом магм. В этой связи повышенная основность гранитоидов полифазного теплинского комплекса, сформированных в гипабиссальных и субвулканических условиях, обусловлена более высокой по сравнению с соседними блоками степенью мафичности субстрата исследуемого района, включающего ряд базальтоидных или близких к ним по составу толщ.

**Ключевые слова:** медно-порфиоровые системы, теплинский плиоцен-плейстоценовый гранитоидный комплекс, медь, золото, молибден, металлогенический анализ, Большой Кавказ.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ВЦ РАН и ЮНЦ РАН, № гос. регистрации проекта АААА-А19-119011190181-1.

**Для цитирования:** Парада С. Г. Рудно-магматические системы медно-порфиорового типа Большого Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (3): 129 – 147, DOI: 10.46698/VNC.2021.73.74.011.

---

---

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION  
OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

---

---

DOI: [10.46698/VNC.2021.73.74.011](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.73.74.011)

Original article

## Ore-magmatic systems of the copper-porphyry type of the Greater Caucasus

S. G. Parada 

Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,  
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: segripa@rambler.ru

*Received: 29.07.2021, revised: 24.08.2021, accepted: 07.09.2021*

**Abstract:** The article is devoted to the identification of the features of the geological structure and mineralogy of the Tanadon-Sangutidon-Kazbek district of the manifestations of copper-porphyry mineralization in the Central part of the Greater Caucasus and the assessment of the correspondence of the geological conditions of mineralization to modern models of ore-magmatic systems of the copper-porphyry type. **The relevance** is determined by the need to develop a scientific and methodological basis for forecasting and searching for hidden mineralization. **Aim.** To identify the features of the geology and mineralogy of the Tanadon-Sangutidon-Kazbek ore region and to establish the correspondence of the mineralization conditions to modern models of ore-magmatic systems of the copper-porphyry type. **Methods.** Comparative geological and metallogenic analysis based on modern geoinformation technologies in the environment of the ArcGIS software package. **Results.** It is established that the ore-magmatic systems of the studied area correspond to the geological and structural position of copper-porphyry deposits. The studied area unites a group of copper-porphyry ore-magmatic systems associated with small granitoid intrusions of the Teplinsky Pliocene-Pleistocene complex. There are also ore occurrences of tungsten, arsenic, gold, antimony, etc., which make up a single genetic series, in which copper-porphyry mineralization occupies a well – defined position-it is timed to the porphyry phase of the latest intrusive magmatism. The comparison of the conditions of the Late Cenozoic mineralization and its characteristics within the studied ore-bearing areas with the main elements of the typical model of the copper-porphyry system allows us to consider the Sangutidon, Teplinsky and Tanadon ore nodes as an expression of the parts of a single ore-magmatic system of the copper-porphyry type superstructuring each other vertically. The newest granite-granodiorite formation of the Greater Caucasus, which is productive for copper-porphyry mineralization, was formed under the conditions of a repeated-rhogenic regime of activation of the region and superimposed on its heterogeneous substrate. The latter within the studied area is characterized by a two-story structure and consists of the Lower-Middle Jurassic volcanogenic-sedimentary complex of the cover and the Pre – Jurassic base, in which the main role is played by the Precambrian-Lower-Middle Paleozoic metamorphic strata of the crystalline basement of the Greater Caucasus, broken by Paleozoic granitoids of the Main Ridge. The composition of Late Neogene granitoids depends on the composition of the substrate, both at the deep levels of its anatexic melting, and on the ascent paths of the magmas formed during this process. In this regard, the increased basicity of granitoids of the polyphase Teplinsky complex formed under hypabyssal and subvolcanic conditions is due to a higher degree of maficity of the substrate of the studied area, which includes a number of basaltoid or similar strata in composition, compared to neighboring blocks.

**Keywords:** copper-porphyry systems, Teplinsky Pliocene-Pleistocene granitoid complex, copper, gold, molybdenum, metallogenic analysis, the Greater Caucasus.

**Acknowledgements:** *The work was performed as part of the implementation of the state task of the VNC RAS and the UNC RAS, state registration number of the project AAAA19-119011190181-1.*

**For citation:** Parada S. G. Ore-magmatic systems of the copper-porphyry type of the Greater Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2021. 11 (3): 129 – 147. DOI: [10.46698/VNC.2021.73.74.011](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.73.74.011).

## Введение

В последние годы возрастает роль медно-порфировых месторождений. Наиболее перспективным на обнаружение новых объектов названного типа считается Дальневосточный регион России [Звездов, 2019].

Вместе с тем, в центральном регионе Тетис, на территории Турции, Армении, Азербайджана, Грузии, Ирана и западной части Пакистана ранее выявлены гигантские золотосодержащие медно-порфировые месторождения, такие как Реко Дик (24 млн т Cu и 1300 т Au), Каджаран (4,6 млн т Cu, 0,94 млн т Mo и 1100 т Au) и другие. Продолжение геологоразведочных работ привело к значительному увеличению запасов золота в известных и новых порфировых месторождениях, таких, например, как Кишладаг (с 160 до 300 т Au), Кёплер (до 115 т Au), Ажи-Даки (до 53 т Au), Сари Гунай (до 93 т Au) и др. [Zürcher et al., 2019].

В мировой литературе отсутствуют сведения о наличии на Северном Кавказе оруденения медно-порфирового типа. Так, в недавно опубликованном обзоре [Zürcher et al., 2019] в пределах Северного Кавказа отмечены лишь три района с рудно-магматическими системами порфирового типа. Согласно рисунку 1, это Тырныаузский, Эльбрусский и Кавминводский районы новейшего интрузивного магматизма и связанного с ним оруденения. Проявления медно-порфирового оруденения Танадон-Сангутидон-Казбекского рудного района в Северной Осетии (Алании) не нашли отражение на представленном рисунке и в указанном выше обзоре. В связи с этим, целью настоящего исследования являлось: проанализировать геологические и минерагенические особенности Танадон-Сангутидон-Казбекского рудного района на предмет отнесения рудно-магматических систем к медно-порфировому типу и оценить перспективы обнаружения в них промышленно значимого медно-порфи-

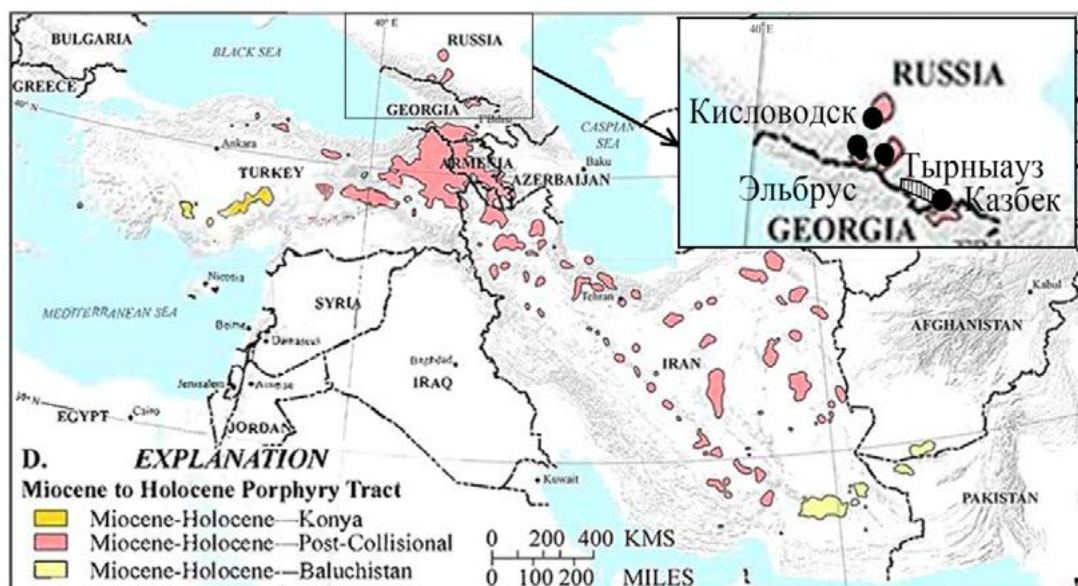


Рис. 1. Миоцен-голоценовые порфировые пояса центрального Тетиса (по [Zürcher et al., 2019]) с дополнениями автора: площадь с вертикальной штриховкой к северо-западу от Казбека – Танадон-Сангутидон-Казбекский район проявлений медно-порфирового оруденения /

Fig. 1. Miocene-Holocene porphyry belts of the central Tethys (according to [Zürcher et al., 2019]) with the author's additions: the area with vertical hatching to the northwest of Kazbek-Tanadon-Sangutidon-Kazbek district of manifestations of copper-porphyry mineralization

рового и имманентно связанного золотого и золото-серебряного эпитермального оруденения.

Актуальность исследования определяется необходимостью разработки научно-методической основы прогнозирования и поисков скрытого оруденения на территории рудных районов Большого Кавказа для диверсификации горнодобывающей отрасли и восстановления экспортного потенциала республик Северного Кавказа.

Настоящая статья посвящена результатам решения следующих задач: 1) выявить особенности геологического строения и минерагении Танадон-Сангутидон-Казбекского рудного района; 2) установить соответствие геологических обстановок оруденения Танадон-Сангутидон-Казбекского района современным моделям рудно-магматических систем медно-порфирового типа.

### Материалы и методы исследования

Основанием для данного исследования является наличие положительных результатов поисковых работ на медь и золото в пределах Танадон-Сангутидон-Казбекского рудного района, представленных в производственных отчетах. Это позволяет вернуться к переоценке известных объектов названных типов в связи со снижением кондиций для отнесения медно-порфировых, золотых и золото-серебряных рудных объектов к категории промышленных, а также в связи с появлением новых данных аэрогеофизических работ.

Исходными данными для настоящего исследования послужили материалы по геологическому строению и рудоносности района и отдельных его участков, содержащиеся в производственных отчетах и публикациях, а также результаты современных отечественных и зарубежных разработок, посвященных медно-порфировым системам. Также использованы материалы современных геофизических среднemasштабных съемок, охватывающих Центральную часть Большого Кавказа и прилегающие территории.

Методическую основу исследования составляет применение современных геоинформационных технологий в целях минерагенического анализа. Для этого осуществлена оцифровка исходных геологических данных и их металлогенический анализ в среде программного комплекса ArcGIS.

### Результаты и обсуждение

Танадон-Сангутидон-Казбекский район проявлений медно-порфирового оруденения объединяет группу медно-порфировых и медно-молибден-порфировых рудно-магматических систем, связанных с малыми гранитоидными интрузиями теплинского плиоцен-плейстоценового магматического комплекса. Однако металлогенический потенциал этих систем не исчерпывается только медью и молибденом. Здесь отмечаются рудопроявления вольфрама, мышьяка, золота, сурьмы и др., составляющие, по-видимому, единый генетический ряд, в котором медно-порфировое оруденение занимает вполне определенную позицию. Оно, как правило, приурочено к порфировой фазе новейшего интрузивного магматизма. Все это в общих чертах соответствует отечественным и зарубежным разработкам, посвященным медно-порфировым системам [Cook et al., 2005; Sillitoe, 2010; Nie et al., 2015; Мигачёв, 2017 и др.]. Опираясь на эти исследования, можно полагать, что рудно-магматические системы Танадон-Сангутидон-Казбекского района соответствуют геолого-

структурной позиции медно-порфировых месторождений в рудных районах в связи со сравнительно небольшими интрузивами рудоносной формации.

### Региональные особенности Танадон-Сангутидон-Казбекского рудного района

Площадь развития рудно-магматических систем Танадон-Сангутидон-Казбекского района характеризуется рядом отличительных черт, которые по аналогии с известными типами геологических обстановок медно-порфирового оруденения могут рассматриваться в качестве его региональных особенностей.

Танадон-Сангутидон-Казбекский район, являясь сегментом складчато-глыбового поднятия Центрального Кавказа, включает в качестве основного структурного элемента сложно построенный Адайхох-Дарьяльский антиклинорий. На юге он граничит по взбросо-надвиговой системе Адайком-Казбекского разлома с Казбекско-Лагодехской складчатой зоной Южного склона. На севере он окаймляется Бурон-Ларским разломом и продолжающей его на западе серией субширотных разрывов, разделяющих здесь Адайхохское поднятие и Штуллу-Харезскую грабен-синклиналь. Ее южная, прилегающая к Адайхохскому блоку часть составляет северную периферию территории Танадон-Сангутидон-Казбекской металлогенической зоны.

Территория Танадон-Сангутидон-Казбекского района характеризуется двухъярусным строением (рис. 2). Нижний ярус представлен комплексом пород доюрского основания Главного Кавказского хребта, верхний сложен нижне-среднеюрскими вулканогенно-осадочными образованиями. Нижнюю часть разреза комплекса основания занимают метаморфические толщи древнего кристаллического фундамента Большого Кавказа, прорванные палеозойскими и мезозойскими гранитоидными интрузивами, а также многочисленными дайками основных и средних по составу пород. В пределах металлогенической зоны наиболее древними породами являются кристаллические сланцы и мигматиты макерской серии. Выше по разрезу кристаллические сланцы и гнейсы макерской серии сменяются метаморфитами кассарской свиты, выходы которой приурочены к южной части Адайхохского блока. Для пород кассарской свиты характерна напряженная складчато-блоковая тектоника, обусловленная ее размещением в зоне Осевого глубинного разлома Главного хребта. По составу кассарская свита отличается четко выраженным фемическим профилем. Около 60% ее объема сложено амфиболитами, амфиболовыми сланцами, метадиабазами, эпидозитами. Остальную часть представляют слюдяные, в основном биотитовые сланцы и парагнейсы с линзами и прослоями мраморов. Широко развиты различные зеленые сланцы (мусковит-хлоритовые, хлорит- и эпидот-кварцевые и др.), образовавшиеся в процессе диафтореза регионально метаморфизованных в условиях эпидот-амфиболитовой фации первичных вулканогенных и песчано-алевритовых толщ.

В строении доюрского фундамента Главного хребта важную роль играют интрузивные массивы средне-верхнепалеозойских гранитоидов, прорывающих и частично преобразовывающих его древние метаморфические образования. Они отнесены к орогенной (карбон-пермь) гранитной формации и подразделяются на ряд территориально обособленных групп, выделяемых в качестве интрузивных комплексов. К востоку от Танадона гранитоиды комплекса Главного хребта образуют обширный Караугом-Цейский массив, где наряду с биотитовыми огнейсованными микроклинизированными гранитами и гранодиоритами отмечаются более поздние интрузивы двуслюдяных и лейкократовых калиевых гранитов.

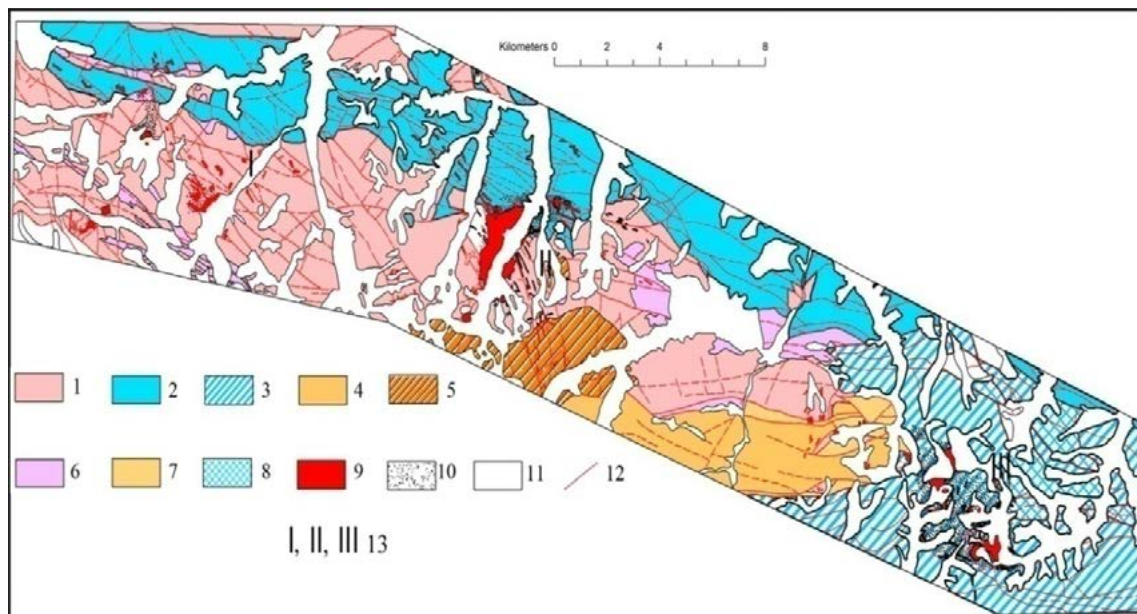


Рис. 2. Геологическое строение Танадон-Сангутидон-Казбегского рудного района  
 1-8 – субстрат рудного района: 1 – образования доюрского основания, палеозойские гранитоиды; 2 – образования мезозойского чехла: нижне-среднеюрский вулканогенно-осадочный комплекс, терригенные и вулканогенные толщи салического профиля; 3 – образования мезозойского чехла: нижне-среднеюрский вулканогенно-осадочный комплекс, терригенные и вулканогенные толщи мафическо-салического профиля; 4 – образования доюрского основания: осадочные и метаморфические толщи салического-мафического профиля (среднепалеозойские метаморфиты кассарской свиты); 5 – образования мезозойского чехла: мезозойские (среднеюрские?) гранитоиды цейского интрузива; 6 – образования доюрского основания: осадочные и метаморфические толщи салического профиля (нижнепалеозойские метаморфиты макерской серии, в том числе буронской свиты); 7 – образования доюрского основания: осадочные и метаморфические толщи салического профиля (верхнепалеозойские отложения баддонской свиты); 8 – образования мезозойского чехла: нижне-среднеюрский вулканогенно-осадочный комплекс, терригенные и вулканогенные толщи мафического профиля; 9 – поздненеогеновый рудоносный гранитоидный комплекс: дайки и штоки пород порфировой фазы, массивы фанеритовых гранитоидов; 10 – контактовые изменения вмещающих пород; 11 – четвертичные отложения и современные ледники; 12 – разломы; 13 – рудные узлы: I – Танадонский, II – Сангутидонский, III – Теплинский /

Fig. 2. Geological structure of the Tanadon-Sangutidon-Kazbegi ore district  
 1-8 – substrate of the ore region: 1 – formations of the Pre – Jurassic base, Paleozoic granitoids; 2 – formations of the Mesozoic cover: lower-Middle Jurassic volcanogenic-sedimentary complex, terrigenous and volcanogenic strata of the salic profile; 3 – formations of the Mesozoic cover: lower-Middle Jurassic volcanogenic-sedimentary complex, terrigenous and volcanogenic strata of the mafic-salic profile; 4 – formations of the pre-Jurassic base: sedimentary and metamorphic strata of the Salic-mafic profile (Middle Paleozoic metamorphites of the Kassar formation); 5 – formations of the Mesozoic cover: Mesozoic (Middle Jurassic?) granitoids of the Cei intrusive; 6 – formations of the Pre-Jurassic base: sedimentary and metamorphic strata of the salic profile (Lower Paleozoic metamorphites of the Makersk series, including the Buron formation); 7 – formations of the pre-Jurassic base: sedimentary and metamorphic strata of the salic profile (Upper Paleozoic deposits of the Baddon formation); 8 – formations of the Mesozoic cover: lower-Middle Jurassic volcanogenic-sedimentary complex, terrigenous and volcanogenic strata of the mafic profile; 9 – late Neogene ore-bearing granitoid complex: dikes and stocks of porphyry phase rocks, massifs of phanerite granitoids; 10 – contact changes of the host rocks; 11 – quaternary deposits and modern glaciers; 12 – faults; 13 – ore nodes: I – Tanadonsky, II – Sangutidonsky, III – Teplinsky

Верхний структурный ярус Танадон-Сангутидон-Казбекского района сложен триас-ранне-среднеюрским вулканогенно-осадочным комплексом, залегающим на палеозойских метаморфических, магматических и осадочных породах с угловым несогласием. В состав мезозойского этажа входят постскладчатые дайки Казбекского диабазового комплекса докелловейского возраста.

Рудоносный интрузивный комплекс Танадон-Сангутидон-Казбекского района представлен малыми интрузиями диорит-гранодиоритовой формации, которая, наряду с монцонит-сиенитовой, признана типоморфной для Лухум-Тырныаузского ареала проявления новейшего рудогенеза Центрального Кавказа [Богатиков и др., 2010]. Повышенная основность этих гранитоидов, входящих в состав единой рудоносной гранит-гранодиоритовой формации Центрального Кавказа, обусловлена, очевидно, более высокой степенью мафичности субстрата Танадон-Сангутидон-Казбекского района по сравнению с другими блоками доюрского фундамента, где временные аналоги теплинских магматитов имеют существенно гранитный состав (Эльджуртинский массив и интрузия лейкократовых гранитов Тырныаузского рудного узла).

Рудоносный интрузивный комплекс рудного района является многофазным образованием, формирование которого происходило в позднем плиоцене-плейстоцене (2,5-1,6 млн лет назад) [Лебедев и др., 2011]. Породы комплекса представлены преимущественно диоритами и гранодиоритами нормальной щелочности К-Na типа, с высокими концентрациями Ti и Mg и имеют Cu-Mo-порфировую металлогеническую специализацию. Считается, что интрузии рудного района сформировались в составе молодого магматизма региона, проявившегося в условиях совмещения геотектонической обстановки континентальной коллизии и геодинамического режима «горячего поля» (горячей точки) мантии [Лебедев и др., 2009; Бубнов и др., 2011].

На основе полевых наблюдений группы исследователей Кавказского института минерального сырья (г. Тбилиси) под руководством Г. Л. Асатиани в 1988 г. и новых данных, изложенных в работах [Новейший..., 2005; Гурбанов и др., 2007; Лебедев, 2009; Гусев, 2014 и др.] установлена последовательность формирования составляющих пород теплинского интрузивного комплекса.

Внедрению гипабиссальных полнокристаллических гранитоидов, составивших интрузивную раму медно-порфировых систем, предшествовал начальный магматический импульс, выразившийся в появлении догранодиоритовых даек и мелких штоков дацитов и риодацитов I фазы, пересечение которых полнокристаллическими гранитоидами четко фиксируется на участке Суарком Теплинского рудного узла.

Во II фазу сформированы мелкозернистые кварцевые диориты, обнажающиеся лишь в пределах Сангутидонского рудного узла, где они слагают небольшой массив площадью около 1 кв. км в правом борту ледника Сангутицете (местность Стыр-Цассуат), а в левом его борту представлены крупным останцем и скоплениями ксенолитов в зоне южного эндоконтакта Сангутидонского массива. Основной объем последнего сложен мелко-среднезернистыми порфировидными гранодиоритами III фазы (главной интрузивной), в составе которой в качестве фациальных разновидностей гранодиоритов встречаются также кварцевые диориты и граниты.

Сангутидонский массив представляет собой сравнительно крупное штокообразное интрузивное тело площадью около 8 кв. км, имеющее в плане эллипсоидную, несколько вытянутую в северо-восточном направлении форму. Нижнеюрские песчанико-сланцевые отложения Штулу-Харезской депрессии в контакте с интрузивом превращены в роговики, ореол которых достигает здесь ширины 1,2 км.



Таким же относительно крупным интрузивным телом, сложенным кварцевыми диоритами и гранодиоритами III фазы, является Теплинский массив, отдельные выходы апикальной части которого прорывают в области междуречья Фиагодна и Ардона (урочище Суарком, гора Тепли, верховья р. Льядон) обширные поля контактово-метаморфизованных нижнеюрских песчанико-сланцевых пород.

Сангутидонский интрузив сопровождается серией сателлитовых тел, представленных мелкими штоками, которые сложены гранодиорит-порфирами с микрозернистой основной массой, являющимися структурно-фациальной разновидностью среднезернистых гранодиоритов III фазы. К ним относятся, в частности, гранодиорит-порфировый шток участка Кайсара в северо-восточном экзоконтакте Сангутидонского массива, а также целый ряд более мелких штоков, прорывающих верхнепалеозойские граниты на западной периферии рудного поля в ущелье р. Сардидон и гранодиориты Цейского массива – на его юго-восточной оконечности.

Такими же гранодиорит-порфирами в пределах Танадонского рудного узла сложено относительно крупное штокообразное интрузивное тело, выступающее своей северной частью из-под ледника Таймази в местности Суарта. Не исключено, что этот шток представляет собой верхнее выклинивание залегающего на глубине интрузива полнокристаллических гранитоидов сангутидонского типа.

Помимо сателлитовой и эндоконтактовой (апикальной) порфировых фаций полнокристаллических гранитоидов, в центральной части Сангутидонского массива на участке медно-молибденового рудопроявления выделяются гранодиорит-порфиры, которые образуют здесь дайки и мелкие штоки, прорывающие гранитоиды III фазы. Полнокристаллические гранитоиды Сангутидонского и Теплинского интрузивов, в том числе и гранодиорит-порфиры, пересекаются комплексом малых субвулканических порфировых тел, выстраивающихся в антидромный ряд риодацит – базальт. Среди них можно выделить образования, по крайней мере, трех фаз внедрения.

С первой субвулканической фазой связано формирование в Сангутидонском рудном узле нескольких порфировых штоков, размещенных в его центральной и северо-западных частях. Среди них наиболее крупным является шток, прорывающий на участке Бурстаранта интрузивно-полнокристаллическую раму Сангутидонского массива и занимающий центральное положение в медно-порфировой системе Сангутидонского рудного узла. В плане шток характеризуется изометрично-округлой, несколько вытянутой в северо-западном направлении формой и имеет размеры 300×500 м.

Он сложен гидротермально переработанными порфирами риодацит-дацитового состава и окаймлен кольцевым телом взрывных брекчий, которые вместе с порфирами составляют единую флюидно-взрывную структуру. Такая же, но меньших размеров структура наблюдается в 1 км южнее Центрального штока, на участке Малый Некк. Взрывными брекчиями сложено крупное штокообразное тело, ограничивающего с запада Суаркомский выход гранитоидов Теплинского массива. Взрывные брекчии встречены также и в Танадонском рудном узле, где они сопряжены с некоторыми из тех дацитовых штоков, которые относятся к образованиям I субвулканической фазы.

Последующие поступления порфировой магмы оформляются в мощную серию пространственно сближенных, крутопадающих субвулканических дайковых тел, размещение которых контролируется системами разрывных нарушений, в основном субширотного и северо-западного простирания с подчиненной ролью северо-

восточных разломов. Протяженность многих даек достигает 2 км при мощности, колеблющейся от 0,5 до 15-20 м.

Послештоковые дайки, пространственно тяготея к центрам проявления позднеальпийского магматизма, выходят далеко за пределы интрузивных рам новейших рудно-магматических систем.

### Минеральные и морфологические типы рудных минерализаций

По данным, изложенным в отчетах о поисковых и геологоразведочных работах, в составе оруденения Танадон-Сангутидон-Казбекского района можно выделить семь минеральных типов: халькопирит-молибденитовый, пирротин-халькопиритовый, арсенопирит-пирит-редкометалльный, халькопирит-галенит-сфалеритовый, сфалерит-барит-галенитовый, ферберит-антимонитовый, реальгар-аурипигментовый (рис. 3). Они проявлены в составе двух морфологических типов, – прожилково-вкрапленном (штокверковом) и жильном.

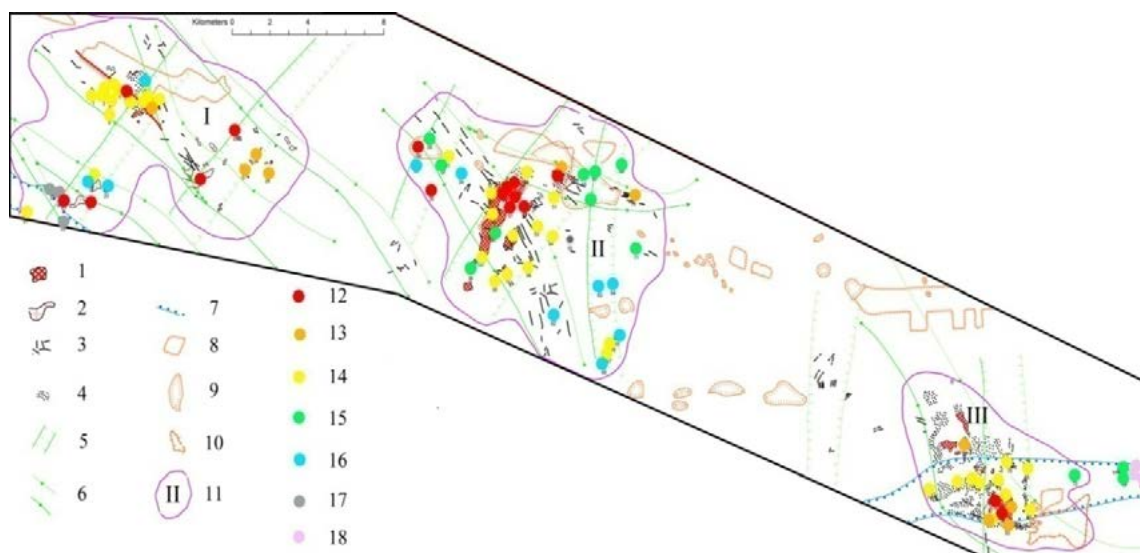


Рис. 3. Схема распределения минеральных типов рудных минерализаций в рудных узлах Танадон-Сангутидон-Казбекского района

1-4 – теплинский позднекайнозойский интрузивный комплекс: 1 – полнокристаллические (фанеритовые) гранодиориты, 2 – гранодиорит-порфиры, 3 – дайки гранодиорит-порфиры и дацитов, 4 – роговики и ороговикованные породы; 5 – позднеальпийские поперечные прогибы; 6 – позднеальпийские сдвиги; 7 – позднеальпийские надвиги; 8-10 – геофизические аномалии; 11 – контуры рудных узлов; 12-18 – минеральные типы рудных минерализаций: 12 – халькопирит-молибденитовый, 13 – пирротин-халькопиритовый, 14 – арсенопирит-пирит-редкометалльный, 15 – халькопирит-сфалерит-галенитовый, 16 – сфалерит-барит-галенитовый, 17 – ферберит-антимонитовый, 18 – реальгар-аурипигментовый /

Fig. 3. Scheme of distribution of mineral types of ore mineralization in the ore nodes of Tanadon-Sangutidon-Kazbek district

1-4 – Teplinsky Late Cenozoic intrusive complex: 1 – full-crystalline (phanerite) granodiorites, 2 – granodiorite-porphyry, 3 – dikes of granodiorite – porphyry and dacite, 4 – hornfels and keratinized rocks; 5 – late Alpine transverse deflections; 6 – late Alpine shifts; 7 – late Alpine thrusts; 8-10 – geophysical anomalies; 11 – contours of ore nodes; 12-18 – mineral types of ore mineralizations: 12 – chalcocopyrite-molybdenum, 13 – pyrrhotite-chalcocopyrite, 14 – arsenopyrite-pyrite-rare metal, 15 – chalcocopyrite-sphalerite-galenite, 16 – sphalerite-barite-galenite, 17 – ferberite-antimonite, 18 – realgar-auripigment

*Халькопирит-молибденитовый тип* проявлен в пределах всех рудных узлов. Наиболее представителен он в **Сангутидонском рудном узле** и наименее – в Танадонском. Этот тип руд является наиболее ранним и характеризует переход от раннещелочной к среднекислотной стадии гидротермального процесса. В морфологическом отношении оруденение представлено главным образом кварцевыми жилами, реже штокверковыми зонами и локализовано в позднекайнозойских гранодиоритах и гранодиорит-порфирах теплинского интрузивного комплекса, а также в верхнепалеозойских гранитоидах и ороговикованных нижнеюрских сланцах.

*Пирротин-халькопиритовый тип.* Халькопирит в этом типе является важнейшим компонентом. С его ранней генерацией в прожилково-вкрапленных рудах ассоциируют, помимо пирротина, сфалерит и висмутин, а с поздней, в жильных и штокверковых зонах – шеелит, вольфрамит, висмутин и пирротин. Из жильных минералов их сопровождают кварц, хлорит и карбонат.

Данный минеральный тип руд представлен двумя морфологическими подтипами: прожилково-вкрапленным и жильным. Оба подтипа широко представлены на всех изученных рудных полях. Промышленное значение первый подтип может иметь на Сангутидонском рудопроявлении, второй – в некоторых жильных зонах Сангутидонского рудного узла, в первую очередь за счет меди и связанных с халькопиритом золота и серебра.

Жильный пирротин-халькопиритовый подтип руд представлен на рудопроявлениях Танадонского рудного узла и на северной периферии Сангутидонского рудопроявления, а также в некоторых проявлениях Теплинского рудного узла.

*Арсенопирит-пирит-редкометалльный тип.* Более всего развит в кварцевых жилах. В этом типе оруденения главными рудообразующими минералами являются арсенопирит и пирит. В переменных количествах с ними встречаются кобальтин, леллингит, висмутин, свинцово-висмутовые (галенобисмутит, козалит), свинцово-сурьмяный буланжерит, железо-сурьмяная (бертьерит) и медно-свинцово-сурьмяная (менегинит) сульфосоли, самородный висмут, тетрадимит (рудопроявление Стыр-Фарс, рудные зоны Танадонского узла).

Жильное оруденение данного типа представлено в зонах северо-восточного и северо-западного простирания и приурочено к центральным частям рудно-магматических систем (рудных узлов). Наиболее четко это проявлено в Сангутидонском узле, где по восстанию жил и к его флангам жилы меняют свой состав от халькопирит- (пирротин) – шеелит-пирит-арсенопиритового, через пирит-арсенопиритовый к халькопирит-галенит-сфалеритовому с сульфосолями, далее к сфалерит-галенитовому.

Помимо охарактеризованных жил, к данному типу руд относятся зоны прожилково-вкрапленной минерализации в гранодиоритах, приуроченные к системам трещин, оперяющих разломы, по которым произошло внедрение даек дацитов. На некоторых рудопроявлениях Теплинского рудного узла оруденение представляет собой интенсивную вкрапленность халькопирита, пирита, марказита и арсенопирита. Отмечаются также сфалерит и молибденит.

*Халькопирит-галенит-сфалеритовый (медно-полиметаллический) и сфалерит-барит-галенитовый (полиметаллический) типы.* Эти типы руд характеризуют периферические части изученных рудных узлов и локализованы в разновозрастных породах: полиметаллические руды в верхнепалеозойских гранитах, мезозойских гранодиоритах цейского комплекса, в нижнеюрских терригенных отложениях; руд-

ные зоны медно-полиметаллического типа, помимо этого, локализованы и в породах неинтрузивного комплекса, что характеризует их как приуроченные к более центральным частям рудно-магматических систем.

Зоны медно-полиметаллических руд, как правило, совмещены в пространстве с зонами арсенопирит-пирит-редкометалльной минерализации.

Ферберит-антимонитовый и реальгар-аурипигментовый типы представлены в кварцевых жилах. Они установлены на проявлениях Теплинского рудного узла, где реальгар-аурипигментовая минерализация наложена на арсенопирит-пирит-редкометалльное и медно-полиметаллическое оруденение, а реальгар-антимонитовая минерализация наблюдается в верхних частях зоны халькопирит-полиметаллического оруденения, вероятно на него накладываясь.

### Оценка соответствия рудных узлов Танадон-Сангутидон-Казбекского района современным моделям рудно-магматических систем медно-порфиорового типа

Построение моделей медно-порфиоровых рудно-магматических систем и месторождений является весьма разработанной областью геологии рудных месторождений. На первых этапах подобных исследований доминировали статистические модели, представлявшие собой обобщения данных по «медно-порфиоровым» регионам, в результате чего были созданы известные «монцитонитовая» [Lowell et al., 1970], «диоритовая» [Hollister, 1974] и общая [Митчел, Гарсон, 1984; Sillitoe, 2010] модели, а также многочисленные современные модели конкретных месторождений [Кривцов и др., 1995; Звездов, Минина, 2010; Gow, Walshe, 2005; Vry et al., 2010; Мансуров, 2014; Парада, 2017; Давыденко и др., 2021; İmer et al., 2016 и др.].

Прикладной аспект моделей МПС (в виде геолого-поисковых моделей) в отечественной литературе активно разрабатывается А. И. Кривцовым, В. С. Звездовым, И. Ф. Мигачевым и другими исследователями [Кривцов и др., 2001; Звездов, Минина, 2010; Сотников, 2006; Мигачев, 2017 и др.].

Месторождения медно-порфиорового типа, согласно обзору, приведенному в [Звездов и др., 2018] локализованы во внутренних частях рудно-магматических систем (РМС) «порфиорового» типа вулcano-плутонических поясов (ВПП). Штокверковые руды этих объектов сосредоточены в эндо-экзоконтактовых зонах гипабиссальных и субвулканических порфиоровых интрузивов (штоков, даек), которые представляют собой завершающие фазы продуктивных плутоногенных формаций и нередко являются апофизами находящихся на глубине крупных магматических тел. Как показывает практика геолого-разведочных работ последних десятилетий [Zürcher et al., 2019; İmer et al., 2016; Звездов и др., 2018 и др.] в ряде стран Южной Америки (Чили, Перу, Аргентина, Боливия), Европы (Венгрия, Сербия, Болгария), Азии (Турция), Юго-Восточной Азии (Филиппины, Папуа-Новая Гвинея, Индонезия), такие системы обладают комплексной металлогенией. В их верхних периферийных частях, обычно в комагматичных вулканитах (туфовых и лавовых фациях, субвулканических телах, экструзивных куполах), при малом или умеренном уровнях эрозии нередко отмечаются эпитермальные Au-Cu или Au-Ag месторождения жильного, жильно-прожилкового, иногда залежного типов. Во фланговых зонах, в фанеритовых интрузивах основных фаз рудоносных формаций или в более древних вулканогенных, осадочных и иных породах субстрата ВПП присутствуют золото-полисульфидные жильные месторождения, а при наличии карбонатных

толщ – проксимальные Au-Cu, реже дистальные скарновые объекты. Как показано в работе [Коваленкер, 2006] образование сопряженных во времени и пространстве порфировых и эпитермальных месторождений проистекает из самой природы металлогении вулканоплутонических областей. Переход от порфировых к эпитермальным обстановкам в таких областях является важнейшей их составляющей.

Вертикальный размах МПС (полный разрез, от фанеритового интрузива до стратовулкана) оценивается интервалом от 2-3 до 5-7 км. Как свидетельствуют результаты разведки медно-порфировых месторождений, вертикальный размах оруденения составляет 200-1200 м.

Типовая модель медно-порфировой системы (МПС) включает набор ниже перечисленных обязательных элементов, конкретное геологическое выражение которых определяется в существенной степени геотектонической позицией, а присутствие (отсутствие) того или иного элемента – в первую очередь глубиной эрозионного среза МПС.

1. Субстрат полнокристаллических (фанеритовых) интрузивов – разновозрастные образования, вмещающие плутоническую составляющую продуктивной вулканоплутонической ассоциации. И хотя основным источником рудного вещества Cu-порфировых месторождений служат магматические очаги, продуцирующие рудоносные интрузивные и вулканогенные формации, не исключается возможность его заимствования из вмещающих пород, включающих надфоновые содержания металлов во вмещающих породах, древние геохимические ореолы рассеяния и древние рудные месторождения. При гидротермальной циркуляции растворов в тепловом поле интрузивов экстрагируемое из них рудное вещество выносится с нижних уровней систем на верхние с переотложением и интегральным накоплением [Звездов, 2019].

2. Рама порфировых интрузивов, которую в большинстве случаев слагают породы предшествующего им фанеритового интрузива. Ее роль могут играть породы субстрата и вулканогенной составляющей вулканоплутонической ассоциации. Продуктивные магматические комплексы представляют анатектические коровые выплавки и принадлежат к известково-щелочной серии. Состав субстрата, подвергающегося частичному плавлению, определяет основные ряды плутонов, сопровождающихся медно-порфировым оруденением: диорит-гранодиоритовый, диорит-монцодиорит-монцитонитовый и диорит-гранодиорит-гранитовый в зависимости от геотектонических условий. Для продуктивных плутонов характерна многофазность при общем гомодромном развитии. Основные фазы обычно представлены гранодиоритами.

3. Рудоносные порфировые интрузивы – главный элемент МПС, обеспечивающий концентрацию флюидопотока, достаточную для образования рудных скоплений. Порфировые тела относительно плутонов занимают преимущественно дискордантное положение, локализуясь в протяженных тектонических зонах, часто далеко выходящих за пределы отдельных фанеритовых интрузивов. Во многих случаях фиксируются признаки, свидетельствующие о различных глубинах становления фанеритовых фаз (гипабиссальная и субвулканическая соответственно). Весьма характерным является последовательное внедрение, часто в один и тот же объем, нескольких порфировых фаз, то есть порфиры образуют многофазную серию пород. По минералогическим, петрохимическим и геохимическим характеристикам порфировые интрузивы близки породам основных фаз фанеритовых плуто-

нов. Для порфиров характерна гомодромно-антидромная линия развития. Обычно рудоносные порфиновые интрузивы имеют форму штоков и штокообразных тел близвертикального залегания с площадью горизонтального сечения в большинстве случаев 0,5-2 км<sup>2</sup>. В отличие от РМС, вмещающих медно-порфиновые месторождения-гиганты, для которых характерен режим интенсивного регионального сжатия на раннем этапе их развития, для РМС, вмещающих мелкие и средние по запасам Au-Mo-Cu- и Au-Cu-порфиновые месторождения третичных андезит-дацитовых островных дуг (ВПП Тихоокеанского кольца, Тетиса, Карпато-Балканской и других минерагенических провинций), характерно формирование в режиме слабого (до нейтрального) растяжения [Cook et al., 2005; Sillitoe, 2010]. Они локализованы во внутренних частях порфировых РМС, в верхних периферийных зонах которых, в близповерхностной зоне интенсивных аргиллизитовых изменений, нередко присутствуют Au-Cu- и Au-Ag месторождения HS и IS типов со стратоидными и жильными рудами. Последние, как показано в [Коваленкер, 2006] являются продуктами разгрузки металлоносных флюидов, отделившихся от тех же магматических очагов, что и высококонцентрированные гидротермальные, участвовавшие в отложении медно-порфировых руд.

4. Брекчиевые тела присутствуют на верхних горизонтах МПС в виде трубо-, воронко- и дайкообразных тел. Брекчии слагаются обломками не только вмещающих пород, но и аллохтонными обломками пород, не встречающихся на данном уровне. Характерна многоактность формирования брекчиевых тел. Они несут весь комплекс черт флюидно-эксплозивных образований. Рудоносность брекчиевых тел связана с ранней минерализацией, проявленной в обломках, и поздней, представленной главным образом в их цементе.

5. И. С. Мигачев [2017], В. С. Звездов и др. [2018] отмечают ведущую структурообразующую роль «каркасов» мелкой трещиноватости, контролирующей медно-порфиновые штокверки. Сами штокверки представляют собой системы разноориентированных рудных прожилков, жил и сопровождающей вкрапленности сульфидов и оксидов Cu, Mo, Fe и других металлов. «Каркасы», а также поровая проницаемость являются необходимым условием для крупномасштабной циркуляции рудоносных растворов и в итоге, наряду с литолого-фациальными факторами (геохимическими и петрофизическими барьерами), определяют морфологию формирующихся зон штокверковой минерализации.

6. Промышленные медно-порфиновые руды сосредоточены во внутренних частях РМС. Во внешних частях формируются эпитеpmальные золотые и золото-серебряные жильные руды [Коваленкер, 2006].

Рудная минерализация бывает представлена закономерным сочетанием в минерализованном объеме нескольких типов руд, из которых наибольшее значение имеют: халькопирит-молибденитовый, халькопирит-борнитовый, пирит-халькопиритовый, полисульфидный. Три первых типа образуют прожилково-вкрапленные штокверковые тела, в общем случае конформные порфировому штоку. Полисульфидные и золото-серебряные эпитеpmальные руды локализованы в жилах, их системах или жильно-прожилковых зонах. Развиты они преимущественно на флангах МПС, но нередко в виде линейных зон накладываются на оруденение внутренних частей МПС.

Наиболее полным набором признаков, описывающих типовую МПС при положении плоскости эрозионного среза, вскрывающим, наряду с флангами, и ее

внутренние продуктивные в отношении оруденения части, характеризуется Сангутидонский рудный узел, комплекс характеристик которого может быть положен в основу разработки эталонной для рудного района поисковой модели золото-медно-порфирирового оруденения.

Центральным элементом РМС Сангутидонского рудного узла должна быть признана двухфазная порфирировая рудогенерирующая система «шток в шток» участка Бурстаранта, состоящая из крупного штокообразного тела гидротермально переработанных субвулканических дацитов и более раннего и мелкого штока субинтрузивных гранодиорит-порфиров. Штоки прорывают фанеритовую интрузивную раму, составленную гипабиссальными порфирированными гранодиоритами Сангутидонского интрузивного массива, а сами, в свою очередь, пересекаются серией сближенных, северо-западного простирания, даек в основном дацитового состава. С внедрением и формированием порфирировых штоков сопряжено образование прожилково-вкрапленной медно-молибденовой минерализации, представленной халькопирит-молибденитовым и более поздним пирротин-халькопиритовым типами руд, которые по латерали сменяются жильными золотоносными арсенопирит-редкометаллическими и далее, во внешнем контуре рудного узла – полиметаллическими рудопроявлениями.

В отличие от Сангутидонского рудного узла, обстановки Теплинского (Суарком) и Танадонского узлов рудной минерализации отвечают, скорее всего, верхнерудному-надрудному (отдаленно-рудному) диапазону МПС. Так, интрузивная рама Сангутидонского типа в Теплинском узле представлена своей апикальной частью, в составе которой вместе с гранодиоритами в качестве их фациальной разновидности значительную роль играют кварцевые диориты. Крупный выход апикальных гранитоидов и фрагмент их в надинтрузивной толще тектонически и гидротермально переработанных роговиков на участке Суарком прорывается серией сближенных даек рудоносных дацитов и андезитов. Для ассоциированного с дайковым комплексом и размещенного в центральной части поля медно-молибденового и мышьяково-оруденений характерны интенсивно проявленные процессы телескопирования. Фланговые части системы маркируются здесь медно-полиметаллическими рудопроявлениями. Вторичные изменения фанеритовых гранодиоритов и дайковых пород представлены здесь лишь пропилитами.

Надрудный «профиль» Танадонского узла подчеркивается преобладанием жильных проявлений золотоносной арсенопирит-редкометаллической минерализации. Роль фанеритовой рамы играет здесь обширный выход палеозойских гранитоидов субстрата, который на участке Суарта прорван гранодиорит-порфирировым штоком, представляющим, по-видимому, верхнее выклинивание интрузива сангутидонского типа. Штоки и дайки рудоносного комплекса носят четко выраженный субвулканический профиль и пространственно сочетаются с вулканическими постройками типа стратовулкана (ледник Бартуицете – перевал Афсану), некками и небольшими покровами андезидацитов и андезитов.

Выявление соответствия обстановок и рудных составляющих конкретных рудоносных площадей определенным уровням эталонной МПС диктуется необходимостью установления плоскости их эрозионного среза относительно уровня возможной локализации промышленно-ценных скоплений руд, что в свою очередь, способствует разработке методов рационального ведения поисков прогнозируемых типов оруденения.

## Заключение

Продуктивная на медно-порфировое оруденение новейшая гранит-гранодиоритовая формация Большого Кавказа образовалась в условиях повторноорогенного режима активизации региона и наложена на его гетерогенный субстрат. Последний в пределах Танадон-Сангутидон-Казбекского района характеризуется двухэтажным строением и состоит из ниже-среднеюрского вулканогенно-осадочного комплекса чехла и доюрского основания, в котором главную роль играют ниже-среднепалеозойские метаморфические толщи кристаллического фундамента Большого Кавказа, прорванные палеозойскими гранитоидами Главного хребта.

Зарождение в коровом субстрате очагов палингенного магмообразования представляется одним из следствий позднеальпийского поддвига жесткой Закавказской плиты под складчато-глыбовое сооружение Большого Кавказа, когда в результате поддвиговых движений вдоль пологих разрывов возникали мощные потоки тепла, провоцирующие процессы корового плавления [Дотдугев, 1987]. Коллекторами для подъема магм служили при этом участки высокой проницаемости, возникшие в результате развития право- и левосдвиговых деформаций соответственно северо-западного и северо-восточного простираний.

Состав позднеэоценовых гранитоидов находится в зависимости от состава субстрата как на глубинных уровнях его анатектического плавления, так и на путях подъема образованных при этом магм.

В этой связи повышенная основность гранитоидов полифазного теплинского комплекса, сформированных в гипабиссальной и субвулканической фациях глубинности, обусловлена более высокой по сравнению с соседними блоками степенью мафичности субстрата Танадон-Сангутидон-Казбекского района, включающего ряд базальтоидных или близких к ним по составу толщ.

Фанеритовые гранитоиды первых гипабиссальных фаз становления комплекса образуют небольшие массивы с площадью, выходов до 8 кв. км, а на глубине, по геофизическим данным, до 10-12 км<sup>2</sup>, сложенные в основном гранодиоритами с подчиненным развитием кварцевых диоритов. По своим петрогеохимическим характеристикам (высокая глиноземистость, принадлежность к калий-натриевой серии пород, содержания редких щелочей, значения отношения калия к рубидию) они относятся к выделенному Л. И. Таусоном [1977] геохимическому типу палингенных известково-щелочных гранитоидов.

Гранодиорит-порфиры, завершающие становление фанеритовых пород, представляют одновременно наиболее раннюю рудоносную порфировую фазу (в субинтрузивной фации), с которой начинается формирование локальных медно-порфировых систем. Продолжение рудного процесса связано с последовательным внедрением двух следующих субвулканических фаз, представленных штоками дацитов, а верхних частях которых развиты тела эксплозивных брекчий, и пересекающими их дайками того же состава. Завершает становление комплекса серия дайковых тел, сложенных более основными и щелочными по составу – от латиандезитов до трахибазальтов включительно – породами, формационная принадлежность которых остается неясной.

Рудоносные субвулканические штоки и дайки, судя по кинематике разломов, размещаются в зонах концентрации напряжений северо-западного северо-северо-западного и запад-северо-западного простираний, возникновение которых связано с изменением поля деформаций на заключительных этапах активизации.



Штокверковая рудная минерализация локализуется в зонах дробления в контактах Центрального порфирирового штока (Сангутидонское рудное поле), а рудные жилы контролируются зонами разрывов различного простирания (Танадонское рудное поле).

### Литература

1. Богатиков О. А., Курчавов А. М., Газеев В. М., Гурбанов А. Г., Докучаев А. Я., Носова А. А. Геолого-петрографические особенности позднемиоценовых гранитоидов Кавказских Минеральных вод и их связь с воздействием суперплюма. // ДАН. – 2010. – Т. 432. №3. – С. 365-369.
2. Бубнов С. Н., Докучаев А. Я., Гольцман Ю. В. N-Q магматизм Большого Кавказа: геодинамическая позиция, геохимическая и металлогеническая специализация, источники расплавов. // Труды института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2011. – №57. – С. 73-75.
3. Гурбанов А. Г., Богатиков О. А., Докучаев А. Я., Газеев В. М., Лексин А. Б., Ляшенко О. В. Транскавказское направление вулканизма: причина, следствие и эпитегрмальная минерализация. // Вестник Владикавказского научного центра. – 2007. – Т. 7. №3. – С. 25-44.
4. Гусев А. И. Кайнозойские гранитоиды Большого Кавказа: петрогенетические типы, флюидный режим и рудоносность. // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – №4. – С. 22-27.
5. Давыденко Д. Б., Парада С. Г. Опыт разделения потенциальных полей донбасса на фоновую, остаточную и локальную составляющие и некоторые результаты интерпретации. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №1. – С. 22-37. DOI: 10.46698/VNC.2021.23.67.003
6. Дотдугев И. С. Проблемы альпийской тектоники большого Кавказа. // В кн.: Геология и полезные ископаемые Большого Кавказа. – М.: Наука, 1987. – С. 48-55.
7. Звездов В. С. Обстановки формирования крупных и сверхкрупных медно-порфирировых месторождений. // Отечественная геология. – 2019. – №5. – С. 16-35.
8. Звездов В. С., Мигачев И. Ф., Минина О. В. Морфологические типы меднопорфирировых штокверков и обстановки их формирования. // Руды и металлы. – 2018. – №4. – С. 37-52.
9. Звездов В. С., Минина О. В. Рудно-магматические системы вулканоплутонических поясов Востока России. // Руды и металлы. – 2010. – №1. – С. 48-59.
10. Коваленкер В. А. Условия формирования и факторы крупномасштабного концентрирования золота порфирировых и эпитегрмальных месторождений. // Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. Том 2. Стратегические виды рудного сырья. – М.: ИГЕМ РАН. – 2006. – С. 143-214.
11. Константинов М. М., Лайпанов Х. Х., Данильченко В. А., Афанасьева Е. Л., Орлов Б. Ю. Геологическое строение и перспективы Танадонского золото-арсенопиритового месторождения. // Разведка и охрана недр. – 2005. – №1. – С. 2-10.
12. Кривцов А. И., Звездов В. С., Гирфанов М. М., Егорова И. В. Количественные характеристики рудообразующих меднопорфирировых систем. // Отечественная геология. – 1995. – №1. – С. 17-28.
13. Кривцов А. И., Звездов В. С., Мигачев И. Ф. Меднопорфирировые месторождения. // Руды и металлы. – 2001. – №6. – С. 89.
14. Лебедев В. А., Бубнов С. Н., Чернышев И. В., Чугаев А. В., Гольцман Ю. В., Вашакидзе Г. Т., Баирова Э. Д. Геохронология и петрогенезис молодых (плиоценовых) гранитоидов Большого Кавказа: Джимарский полифазный массив, Казбекская неовулканическая область. // Геохимия. – 2009. – №6. – С. 582-602.

15. Лебедев В. А., Чернышев И. В., Шарков Е. В. Геохронологическая шкала и эволюция позднекайнозойского магматизма Кавказского сегмента Альпийского пояса. // Доклады академии наук. – 2011. – Т. 441. № 4. – С. 521-526.
16. Мансуров М. И. Модели рудно-магматических систем медно-порфировых месторождений Гошгарчайского рудного поля (Малый Кавказ, Азербайджан). // Известия Сибирского отделения. Секции наук о Земле РАН. – 2014. – № 4 (47). – С. 29-42.
17. Мигачёв И. Ф. Основные геолого-структурные обстановки проявления медно-порфировых месторождений в рудных районах. // Отечественная геология. – 2017. – № 6. – С. 25-30.
18. Митчел А., Гарсон М. Глобальная геотектоническая позиция минеральных месторождений. – М.: Мир, 1984. – 496 с.
19. Новейший и современный вулканизм на территории России; отв. ред. Лаверов Н. П. – М.: Наука, 2005. – 602 с.
20. Парада С. Г. Перспективные типы месторождений и рудопроявлений золота Юга России. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 1. – С. 57-72.
21. Сотников В. И. Медно-молибден-порфировая рудная формация: природа, проблема объема и границ. // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. № 3. – С. 355-363.
22. Таусон Л. И. Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов. – М.: Наука, 1977. – 278 с.
23. Cook D. R., Hollings P., Walshe J. L. Giant Porphyry Deposits: Characteristics, Distribution, and Tectonic Controls. // *Econ. Geol.* – 2005. – Vol. 100. – pp. 801-818.
24. Gow P. A., Walshe J. L. The Role of Preexisting Geologic Architecture in the Formation of Giant Porphyry-Related Cu±Au Deposits: Examples from New Guinea and Chile. // *Econ. Geol.* – 2005. – Vol. 100. – pp. 819-833.
25. Hollister V. F. Regional characteristics of porphyry copper deposits of South America. // *Soc. Mining Engineers AIME Trans.* – 1974. – Vol. 255. – pp. 45-53.
26. İmer A., Richards J. P., Muehlenbachs K. Hydrothermal Evolution of the Çöpler Porphyry-Epithermal Au Deposit, Erzincan Province, Central Eastern Turkey. // *Econ. Geol.* – 2016. – Vol. 111. – pp. 1619-1658.
27. Lowell J. D., Guilbert J. M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry copper deposits. // *Econ. Geol.* – 1970. – Vol. 65. – pp. 373-409.
28. Nie F., Jiang Z., Li Q., Wang F. The discovery of the Pebble giant porphyry Cu-Au-Mo deposit in Southwest Alaska, USA, and its enlightenment significance // *Geol. Bull. China.* – 2015. – Vol. 34. No. 6. – pp. 999-1010.
29. Sillitoe R. H. Porphyry Copper Systems. // *Econ. Geol.* – 2010. – Vol. 105. – pp. 3-41.
30. Vry V. H., Wilkinson J. J., Millan J. S. J. Multistage Intrusion, Brecciation, and Veining at El Teniente, Chile: Evolution of a Nested Porphyry System. // *Econ. Geol.* – 2010. – Vol. 105. – pp. 119-153.
31. Zürcher L., Bookstrom A. A., Hammarstrom J. M., Mars J. C., Ludington S. D., Zien-tek M. L., Dunlap P., Wallis J. C. Tectono-magmatic evolution of porphyry belts in the Central Tethys region of Turkey, the Caucasus, Iran, Western Pakistan, and Southern Afghanistan. // *Ore Geology Reviews.* – 2019. – Vol. 111. – pp. 102849-102929. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.02.034

## References

1. Bogatikov O. A., Kurchavov A. M., Gazeyev V. M., Gurbanov A. G., Dokuchaev A. Ya., Nosova A. A. Geological and petrographic features of the Late Miocene granitoids of the Caucasian Mineral Waters and their relationship with the impact of the superplume. *DAN*, 2010. Vol. 432. No. 3. pp. 365-369. (In Russ.)
2. Bubnov S. N., Dokuchaev A. Ya., Goltsman Yu. V. N-Q magmatism of the Greater Caucasus: geodynamic position, geochemical and metallogenic specialization, sources of melts. In:

Proceedings of the Institute of Geology of the DSC RAS, 2011. No. 57. pp. 73-75. (In Russ.)

3. Gurbanov A. G., Bogatkov O. A., Dokuchaev A. Ya., Gazeev V. M., Leksin A. B., Lyashenko O. V. Transcaucasian direction of volcanism: cause, effect and epithermal mineralization. *Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center*, 2007. Vol. 7. No. 3. pp. 25-44. (In Russ.)

4. Gusev A. I. Cenozoic granitoids of the Greater Caucasus: petrogenetic types, fluid regime and ore content. *Modern high technologies*, 2014. No. 4. pp. 22-27. (In Russ.)

5. Davydenko D. B., Parada S. G. The experience of dividing the potential fields of Donbass into background, residual and local components and some results of interpretation. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 22-37. DOI: 10.46698/VNC.2021.23.67.003 (In Russ.)

6. Dotduev I. S. Problems of Alpine Tectonics of the Greater Caucasus. *Geology and Mineral Resources of the Greater Caucasus*. Moscow. Nauka, 1987. pp. 48-55. (In Russ.)

7. Zvezdov V. S. The setting of the formation of large and super-large porphyry copper deposits. *Otechestvennaya geologiya*, 2019. No. 5. pp. 16-35. (In Russ.)

8. Zvezdov V. S., Migachev I. F., Minina O. V. Morphological types of porphyry copper stockworks and settings of their formation. *Ores and metals*, 2018. No. 4. pp. 37-52. (In Russ.)

9. Zvezdov V. S., Minina O. V. Ore-magmatic systems of the volcano-plutonic belts of the East of Russia. *Ores and metals*, 2010. No. 1. pp. 48-59. (In Russ.)

10. Kovalenker V. A. Formation conditions and factors of large-scale concentration of gold in porphyry and epithermal deposits. Large and super-large deposits of ore minerals. Vol. 2. Strategic types of ore raw materials. Moscow. IGEM RAN, 2006. pp. 143-214. (In Russ.)

11. Konstantinov M. M., Laipanov Kh. Kh., Danilchenko V. A., Afanasyeva E. L., Orlov B. Yu. Geological structure and prospects of the Tanadon gold-arsenopyrite deposit. *Exploration and protection of mineral resources*. 2005, No. 1. pp. 2-10. (In Russ.)

12. Krivtsov A. I., Zvezdov V. S., Girfanov M. M., Egorova I. V. Quantitative characteristics of ore-forming porphyry copper systems. *Otechestvennaya geologiya*, 1995. No. 1. pp. 17-28. (In Russ.)

13. Krivtsov A. I., Zvezdov V. S., Migachev I. F. Porphyry copper deposits. *Ores and metals*, 2001. No. 6. 89 p. (In Russ.)

14. Lebedev V. A., Bubnov S. N., Chernyshev I. V., Chugaev A. V., Goltsman Yu. V., Vashakidze G. T., Bairova E. D. Geochronology and petrogenesis of young (Pliocene) granitoids of the Greater Caucasus: Dzhimar polyphase massif, Kazbek neovolcanic region. *Geochemistry*, 2009. No. 6. pp. 582-602. (In Russ.)

15. Lebedev V. A., Chernyshev I. V., Sharkov E. V. Geochronological scale and evolution of Late Cenozoic magmatism of the Caucasian segment of the Alpine belt. *DAN*, 2011. Vol. 441. No. 4. pp. 521-526. (In Russ.)

16. Mansurov M. I. Models of ore-magmatic systems of porphyry copper deposits of the Goshgarchay ore field (Maly KavKaz, Azerbaijan). *Bulletin of the Siberian Branch. Section of Earth Sciences of the RANS*, 2014. No. 4 (47). pp. 29-42. (In Russ.)

17. Migachev I. F. The main geological and structural settings of the manifestation of porphyry copper deposits in ore regions. *Otechestvennaya geologiya*, 2017. No. 6. pp. 25-30. (In Russ.)

18. Mitchell A., Garson M. *Global geotectonic position of mineral deposits*. Moscow. Mir, 1984. 496 p. (In Russ.)

19. *The newest and modern volcanism on the territory of Russia*. ed. Laverov N. P. Moscow. Nauka, 2005. 602 p. (In Russ.)

20. Parada S. G. Promising types of golden deposits and ore manifestations of Russian South. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2017. No. 1. pp. 57-72. (In Russ.)

21. Sotnikov V. I. Copper-molybdenum-porphyry ore formation: nature, problem of volume and boundaries. *Geology and Geophysics*, 2006. Vol. 47. No. 3. pp. 355-363. (In Russ.)

22. Tauson L. I. *Geochemical types and potential ore content of granitoids*. Moscow. Nauka, 1977. 278 p. (In Russ.)

23. Cook D.R., Hollings P., Walshe J.L. Giant Porphyry Deposits: Characteristics, Distribution, and Tectonic Controls. *Econ. Geol.*, 2005. Vol. 100. pp. 801-818.
24. Gow P.A., Walshe J.L. The Role of Preexisting Geologic Architecture in the Formation of Giant Porphyry-Related Cu±Au Deposits: Examples from New Guinea and Chile. *Econ. Geol.*, 2005. Vol. 100. pp. 819-833.
25. Hollister V.F. Regional characteristics of porphyry copper deposits of South America. *Soc. Mining Engineers AIME Trans.*, 1974. Vol. 255. pp. 45-53.
26. İmer A., Richards J.P., Muehlenbachs K. Hydrothermal Evolution of the Çöpler Porphyry-Epithermal Au Deposit, Erzincan Province, Central Eastern Turkey. *Econ. Geol.*, 2016. Vol. 111. pp. 1619-1658.
27. Lowell J.D., Guilbert J.M. Lateral and vertical alteration- mineralization zoning in porphyry copper deposits. *Econ. Geol.*, 1970. Vol. 65. pp. 373-409.
28. Nie F., Jiang Z., Li Q., Wang F. The discovery of the Pebble giant porphyry Cu-Au-Mo deposit in Southwest Alaska, USA, and its enlightenment significance. *Geol. Bull. China*, 2015. Vol. 34. No. 6. pp. 999-1010.
29. Sillitoe R.H. Porphyry Copper Systems. *Econ. Geol.*, 2010. Vol. 105. pp. 3-41.
30. Vry V.H., Wilkinson J.J., Millan J.S. J. Multistage Intrusion, Brecciation, and Veining at El Teniente, Chile: Evolution of a Nested Porphyry System. *Econ. Geol.*, 2010. Vol. 105. pp. 119-153.
31. Zürcher L., Bookstrom A.A., Hammarstrom J.M., Mars J.C., Ludington S.D., Zien-tek M.L., Dunlap P., Wallis J.C. Tectono-magmatic evolution of porphyry belts in the Central Tethys region of Turkey, the Caucasus, Iran, Western Pakistan, and Southern Afghanistan. *Ore Geology Reviews*, 2019. Vol. 111. pp. 102849-102929. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.02.034

УДК 550.31:622.4:622.019

DOI: [10.46698/VNC.2021.17.27.012](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.17.27.012)

Оригинальная статья

## Влияние ветрового режима и давления атмосферного воздуха на надежность вентиляции рудников и организм человека

И. Д. Алборов , В. Б. Заалишвили 

Геофизический институт – филиал ФГБУН ФНЦ «Владикавказский научный центр Российской академии наук», Россия, РСО-Алания, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: [datos.ru@yandex.ru](mailto:datos.ru@yandex.ru)

Статья поступила: 03.08.2021, доработана: 06.09.2021, принята к публикации: 14.09.2021

**Резюме: Актуальность работы.** Статья посвящена обоснованию учета естественной тяги на эффективность и надежность проветривания рудников со сложной вентиляционной сетью при многостольном вскрытии месторождений полезных ископаемых. **Цель работы.** Показан уровень на легкие горнорабочих в условиях пониженного атмосферного давления. В статье приведены результаты исследований по влиянию метеорологических и геофизических факторов на надежность проветривания вентиляционных систем в условиях высокогорья. Показана динамика влияния ветровых потоков при штольневом вскрытии месторождений на устойчивость воздухообмена горных выработок и шахт в целом. **Методы работы.** Даются теоретические формулы по расчету естественной тяги при различных направлениях вектора скорости воздушных потоков на дневной поверхности. Приведен метод учета естественной тяги в различных уровнях барометрического давления. **Результаты работы.** Показан учет барометрического коэффициента при различных уровнях расположения горной выработки над уровнем моря. Показано, что без учета геофизических факторов метеоусловий местности обеспечение надежного проветривания рабочих мест рудника невозможно. Отмечено, что снижение парциального давления кислорода в альвеолах легких приводит к нарушению нормального ритма дыхательной функции организма человека. Это способствует к развитию дисфункции и ослаблению резистентности человека и к иным заболеваниям, что снижает потенциальную работоспособность и профессиональные качества трудящегося. Вводятся соответствующие корректирующие коэффициенты по нормируемой запыленности и по системе вентиляции для обеспечения надежной работы при всех отклонениях. Даются рекомендации по учету барометрического давления при нормировании вредных выделений в рудничную атмосферу. Предлагаемое решение учета давления атмосферного воздуха рекомендовано Госгортехнадзору и Государственным учреждениям санитарно-гигиенического нормирования внести в коррективы по нормированию вредных веществ в воздухе рабочей зоны с учетом барометрического коэффициента, что позволит снизить нагрузку на легкие работающих и уровень профзаболевания горняков.

**Ключевые слова:** депрессия естественной тяги, скорость воздуха, направление потока, барометрический коэффициент, нагорные рудники, ветровой напор.

**Для цитирования:** Алборов И.Д., Заалишвили В.Б. Влияние ветрового режима и давления атмосферного воздуха на надежность вентиляции рудников и организм человека. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (3): 148 – 159. DOI: [10.46698/VNC.2021.17.27.012](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.17.27.012).

[DOI: 10.46698/VNC.2021.17.27.012](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.17.27.012)

Original paper

## Influence of wind conditions and pressure the influence of atmospheric air on the reliability of mine ventilation and the human body

I. D. Alborov , V. B. Zaalishvili 

Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,  
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: datos.ru@yandex.ru

Received: 03.08.2021, revised: 06.09.2021, accepted: 14.09.2021

**Abstract: Relevance.** The paper is devoted to substantiation of consideration of natural draught on efficiency and reliability of ventilation of mines with complex ventilation network in multi-wall opening of mineral deposits. The level on lungs of miners in conditions of reduced atmospheric pressure is shown. **Aim.** The article presents the results of studies on the influence of meteorological and geophysical factors on the reliability of ventilation systems in high mountain conditions. It shows the dynamics of the influence of wind flows during adit opening of deposits on the stability of air supply of mine workings and mines as a whole. The theoretical formulas for calculating the natural draught at different directions of the velocity vector of air flows on the day surface are given. **Methods.** The method of taking into account the natural draught in different levels of barometric pressure is given. Consideration of the barometric coefficient at different levels of the location of the mine above sea level is shown. **Results.** It is shown that without taking into account geophysical factors of meteorological conditions of the area to ensure reliable ventilation of working places of the mine. It is noted that the decrease of the partial pressure of oxygen in the lung alveoli leads to disturbance of the normal rhythm of the respiratory function of the human body. This contributes to the development of dysfunction and weakening of human resistance and other diseases, which reduces the potential work capacity and professional qualities of the worker. Appropriate correction factors for normalized dustiness and ventilation system are introduced to ensure reliable operation under all deviations. Recommendations are given for taking into account barometric pressure when rationing harmful emissions into the mine atmosphere. The proposed solution for taking into account atmospheric air pressure is recommended to Gosgortekhnadzor and State institutions of hygienic rationing to make adjustments for rationing harmful substances in working area air with regard to the barometric factor, which will reduce the burden on workers' lungs and the level of occupational diseases of miners.

**Keywords:** depression of natural thrust, air velocity, flow direction, barometric coefficient, upland mines, wind pressure.

**For citation:** Alborov I.D., Zaalishvili V.B. Influence of wind conditions and pressure the influence of atmospheric air on the reliability of mine ventilation and the human body. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (3): 148–159. DOI: 10.46698/VNC.2021.17.27.012.

### Введение

Вентиляция рудников со штольневым вскрытием рудного тела является сложной аэродинамической научно-практической задачей. В связи с этим при проектировании вентиляции таких рудников прибегают к аэродинамическому моделированию вентиляционных систем [Bernardo, da Gama, 1997; Sarac, Sensogut, 2000; Krach, 2011; Suvar et al., 2012, 2013; Castilla-Gomez et al., 2015; Dziurzynski et al., 2015, 2017; Nyaaba et al., 2015; Rezaei et al., 2019; Jha, 2017; Morar et al., 2017; Li et al., 2018; Maleki et al., 2018; Gangrade et al., 2019; Wu et al., 2019; Kobylkin, Kharisov,

2020; Liu et al., 2020]. Однако на практике вентиляционные службы рудников и шахт часто сталкиваются с вентиляционными системами, трудно поддающиеся реальному моделированию, что обуславливает проведение депрессионных съемок отдельных участков, вентиляционных ветвей или шахты в целом. Обеспеченность горных выработок и забоев потребным объемом свежего воздуха зависит от адекватного учета факторов, влияющих на его распределение по пути движения потока к месту доставки. На практике встречается множество причин, препятствующих обеспечению эффективного проветривания, как отдельных горных выработок или отдельного забоя, так и групп забоев, что может приводить к превышению санитарных норм по пылегазовому загрязнению воздуха рабочей зоны. Это обстоятельство при систематическом нарушении вентиляции может привести к развитию у работающих профессионального заболевания – силикоза или других отклонений в организме горнорабочих [Романченко, 2019; Колесов, 2019; Roghanch, Kocsis, 2017; Tariq, Bekir, 2017; Carriere et al., 2017]. Особенно сложно приходится в вентиляционных сетях в случае рассредоточенных утечек (подсосов). В таких сетях (в квадратичной зависимости) идет уменьшение (увеличение) сопротивления вентиляционной системы, что непременно сказывается на надежности вентиляции, как участка, так и рудника в целом. Немаловажное значение имеет и ориентация вскрывающихся рудное тело штолен относительно розы ветров, так совпадение направления вектора скорости ветра с осью горной выработки способствует или противостоит депрессии, развиваемой вентилятором в этой ветви. Другой составляющей, влияющей на состояние человека в условиях высокогорья, является барометрическое давление, являющегося главным в определении плотности, и, следовательно, объемного веса воздуха, от величины которого напрямую зависит частота дыхания – фактора, определяющего нагрузку на легкие человека.

Уточнение решения поставленной задачи по расчету вентиляции высокогорных рудников позволит обеспечить более высокую надежность доставки свежего воздуха на рабочие места и снизит уровень риска развития заболеваний у горнорабочих.

**Целью работы** является установление взаимосвязи между уровнем атмосферного давления и напряженностью труда горнорабочих, а также влиянием ветрового напора на дневной поверхности на надежность вентиляции рудников со штольневый вскрытием.

### Методы исследований

Для решения поставленной задачи были использованы классические законы аэродинамики и экспериментальные инструментальные замеры естественной тяги и связанных с ними физических параметров атмосферного и рудничного потоков воздуха [Архангельский, 2017; Гончаренко, Коростелев, 2018; Калугов, Юков, 2020; Крымская, 2017; Экология, 2016].

При добыче руд в недрах горных территорий (рудники Кавказа, Алтая, Казахстана, Кольского полуострова и др.) месторождения имеют штольневое вскрытие. Вскрывающие штольни используются в системе вентиляции рудников. В то же время, на практике встречаются многочисленные геодинамические явления [Иванов и др., 2020; Черкашин, Газалиев, 2019; Svalova et al., 2019], разрушающие целостность массивов горных пород, и приводящие к возникновению аэродинамических связей потоков воздуха через возникающие трещины и обрушения с другими ветвями вентиляционной системы или с дневной поверхностью. Такие аэроди-

намические связи ослабляют надежность подачи потребного объема свежего воздуха на рабочие места рудника. Метеорологические параметры на дневной поверхности, вскрывающих месторождения штолен в горах Северного Кавказа, обусловлены близким расположением вечных снегов и ледников. Особенность ветрового режима района определяется орографическими условиями, в соответствии с которыми преобладают местные горно-долинные ветры. В дневное время ветер дует снизу вверх – долинный ветер, ночью – в темное время суток в обратном направлении – горный ветер. В районе бывшего горного поселения вблизи зоны горного отвода рудника «Молибден» наблюдаются боковые ветры со стороны Главного Кавказского хребта, спускающиеся в ущелье по долине. Ветры носят характер горных фёнов. Число дней с ветром (15 м/с и более) в зоне горного отвода составляет 25 в году, достигая максимума – 50. В числе бурных ветров бывают ураганы со скоростью 80 м/с и более. Усиленные ветры дуют с юго-запада и юга. Они имеют особенные черты фёнов и сопровождаются повышением температуры и понижением относительной влажности воздуха. По данным Института ГИПРОНИКЕЛЬ фёны, как правило, продолжаются около 10-12 часов, периодами удерживаясь до нескольких суток.

В процессе выполнения исследований учитывались такие факторы, как: геодезическая высота расположения штолен, участвующих в системе проветривания рудника и наличие аэродинамических связей вентиляционных выработок с дневной поверхностью.

Для учета влияния скорости ветра была использована статистика движения воздуха на дневной поверхности и роза ветров на уровнях вскрывающих штолен из отчета многолетних исследований Института ГИПРОНИКЕЛЬ.

Для нормирования запыленности воздуха на рабочих местах в меняющихся барометрических условиях высокогорья необходимо иметь правовую основу учета такого норматива. При нормальных барометрических условиях (геодезическая высота –  $Z = 0$ , давление воздуха –  $p = 760$  мм рт. ст., наличие кислорода в атмосфере составляет 20,96%). При таких условиях частота дыхания человека составляет в среднем 12 раз в минуту, а уровень освоения кислорода красными кровными тельцами в легких достигает 6-7%, т.е. переработанный в организме воздух имеет содержание кислорода около 14%.

Главной характеристикой горных ландшафтов остается вертикальная зональность с температурным градиентом, не свойственным остальной территории планеты Земля [Алексеенко, 1998; Медведев и др., 1984; Израэль, 1984]. В связи с этим горными территориями считаются местности, где среда обитания: высота рельеф и климат – создает особые условия, влияющие на повседневную человеческую деятельность [Закон РСО-Алания, 1998]. В соответствии с принятым законом горные территории подразделяются на:

- низкогорье – до 1000 метров над уровнем моря;
- среднегорье – от 1001 до 2000 метров над уровнем моря;
- высокогорье – свыше 2001 метра над уровнем моря.

## Результаты исследований

### **Влияние депрессии естественной тяги на эффективность проветривания**

В проветривании нагорных рудников наряду с принудительной вентиляцией (вентиляторы) объективно участвует тепловая депрессия (ТД), проявление которой называют естественной тягой ( $h_c$ ). Возникновение ее обусловлено рядом следую-



щих факторов: различная плотность воздуха в подающих и выдающих выработках (при наличии различных высотных отметок), а для тоннелей – разность высот порталов, температуры наружного воздуха и воздуха тоннеля, различная плотность воздуха по обе стороны горы, обусловленная разностью температур воздуха и барометрического давления и, наконец, капез (движение) воды в подающей или выдающей выработках. Основными факторами, обуславливающими изменение плотности воздуха в выработках вентиляционной сети нагорных рудников, являются барометрическое давление и температура. Заметное влияние на величину депрессии естественной тяги при многоэтажном штольневом вскрытии нагорных месторождений оказывает ветровое давление атмосферного воздуха, которое в зависимости от направления ветра относительно оси штольни, увеличивает или уменьшает величину тепловой депрессии [Воропаев, 1966].

Величина ветрового давления (напора) определяется по формуле:

$$h_{\text{ветер}} = \frac{V_{\text{в}}^2 \cdot \gamma}{2} \cdot \cos^2 \cdot \alpha, \quad (1)$$

где:

$V_{\text{в}}$  – скорость ветра, м/с;

$\gamma$  – плотность воздуха на выходе в штольню, кг/м<sup>3</sup>;

$\alpha$  – угол между направлением ветра и осью штольни, град.

Для расчета гидростатических и термодинамических характеристик естественной тяги авторами проанализированы несколько методов. В ряде случаев  $h_e$  определяют как разность статических давлений воздуха в воздухоподающих и воздуховыдающих выработках:

$$h_e = H \cdot (\gamma_{\text{ср.п}} - \gamma_{\text{ср.в}}) \cdot g \quad (2)$$

где:

$H$  – длина проекции вентиляционной выработки на вертикальную плоскость, м;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\gamma_{\text{ср.п}}$ ,  $\gamma_{\text{ср.в}}$  – плотность воздуха в воздухоподающих и воздуховыдающих выработках, кг/м<sup>3</sup>.

Применение метода связано с выполнением вычислений по определению средней плотности воздуха:

$$\gamma_{\text{ср.}} = 0,465/n \left( P_1/T_2 + P_2/T_2 + \dots + P_n/T_n \right), \text{ кг/м}^3 \quad (3)$$

где:  $n$  – число опытов;

$P_1, P_2, \dots, P_n$  и  $T_1, T_2, \dots, T_n$ , барометрические давления, мм. рт. ст. и термодинамическая температура воздуха, соответственно.

Метод не учитывает влияние влаги и химического состава воздуха. Согласно работе [Комаров, Килькеев, 1969]:

$$h_e = P_0 \cdot H / 100 (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot g, \text{ Па} \quad (4)$$

где:

$P_0$  – барометрическое давление, мм. рт. ст.;

$\alpha$  – барометрический коэффициент.

$$\alpha_1 = 13,6 \times 100 (RT_1)^{-1}; \alpha_2 = 13,6 \times (RT_2)^{-1}. \quad (5)$$

Величины  $\alpha_1, \alpha_2$  для различных температур выбирают из таблицы 1.

Таблица 1 / Table 1

## Значение барометрического коэффициента /

## Value of the barometric coefficient

$t_{cp.}$	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
$\alpha$	0,191	0,187	0,184	0,189	0,177	0,174	0,170	0,167	0,161	0,163	0,159

При  $H > 100$  м значения  $h_e$  умножают на коэффициент  $K = 1 + H \times 10^{-4}$ .

Термодинамические методы основаны на представлении депрессии тепловой тяги  $h_e$  как работа, совершаемая единицей объема воздуха при его движении по вентиляционной сети. Для ее вычисления определяют температуру воздуха в пунктах, геодезическая высота которых известна [Воропаев, 1950] по формуле:

$$h_e = \gamma_{cp} \times S_k \times T_2^{-1} \times g, \text{ Па}, \quad (6)$$

где:  $\gamma_{cp}$  – средняя плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$ ;

$S_k$  – площадь многоугольника в координатах, полученная отложением по оси ординат геодезических высот замерных точек по длине вентиляционной струи, а по оси абсцисс – температура воздуха в этих точках;

$T_2$  – средняя термодинамическая температура, соответствующая центру тяжести  $T_{ц}$  площади многоугольника;

$g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Температура центра тяжести площади определяется.

$$T_{ц} = 1/2 (T_{min.} + T_{max.}), \quad (7)$$

где:  $T_{min.}$ ,  $T_{max.}$  – минимальная и максимальная температура в контуре многоугольника,  $^{\circ}\text{К}$ .

Плотность воздуха  $\gamma_{cp}$  увязана с барометрическим давлением для равнинных рудников [Воропаев, 1950; Алборов, 1986], принимается равной  $1,25 \text{ кг/м}^3$ , для условий нагорных рудников она достигает  $1 \text{ кг/м}^3$ .

Достоинство описанной группы методов – возможность определения не только величины общей депрессии естественной тяги, но и ее значения для отдельных контуров вентиляционной сети, например, для нагорных рудников, составляющими которых являются горизонтальные штольни.

### Корректировка запыленности рудничного воздуха в условиях высокогорья

В условиях, соответствующих стандартным (нормальным) предельное содержание вредных веществ устанавливается санитарными нормами с ГН 2.2.5.3532.18. В частности, предельно допустимое содержание в воздухе токсичной (силикозоопасной) пыли составляет  $1 \text{ мг/м}^3$ , а при работе в условиях менее силикозоопасной пыли в атмосфере (содержание свободного кремнезема колеблется в пределах от 10 до 70%) предельно допустимая концентрация не должна превышать  $2 \text{ мг/м}^3$ .

При пониженном барометрическом давлении (в высокогорных условиях) плотность воздуха падает пропорционально уровню атмосферного давления, определяемого формулой:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T}, \text{ кг/м}^3 \quad (8)$$

$p$  – барометрическое давление на местности, мм. рт. ст.;

$p_0$  – нормальное барометрическое давление,  $p_0 = 760$  мм. рт. ст.;

$T_0$  – абсолютная температура в градусах Кельвина  $273^0$  К;

$T$  – температура воздуха на местности,  $T = T_0 + t$ , где  $t$  – температура в градусах Цельсия.

Таким образом, при одинаковых запыленностях в единице объема атмосферного воздуха  $j$ :

$$k_{\hat{a}} = \frac{p}{p_0}, \quad (9)$$

где  $p$  и  $p_0$  – то же, что и в предыдущей формуле.

Таким образом, изменение ПДК в высокогорных условиях происходит по формуле:

$$g_{i.\hat{a}} = g_0 \cdot k_{\hat{a}} \quad (10)$$

где:  $g_0$  – ПДК загрязняющего вещества в соответствии с ГН 2.2.5.3532.18,  $\text{мг/м}^3$  (для условий ТВМК и Садонского СЦК  $g_0 = 2 \text{ мг/м}^3$ );

$g_{o.\hat{a}}$  – ПДК загрязняющего вещества в высокогорных условиях,  $\text{мг/м}^3$ ;

$k_{\hat{a}}$  – коэффициент высокогорья [Алборов, 1986; Алборов, Хадзарагов, 1978] или поправочный коэффициент, характеризующий уровень разреженности атмосферы местности, определяющийся по таблице 2.

*Таблица 2 / Table 2*

### Значение поправочного коэффициента давления /

#### Value of the pressure correction coefficient

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Барометрическое давление, мм рт. ст. / Barometric pressure, millimeter mercury column	700	660	620	580	540	500	460	420
Коэффициент, $K_{\hat{a}}$ / Coefficient, $K_{\hat{a}}$	0,92	0,86	0,81	0,76	0,71	0,66	0,6	0,55

Графически эта картина показана на рисунке 1.

### Выводы

Устойчивость вентиляции рудников при многоштольневом вскрытии месторождений зависит от ветрового напора на устье штольни, величина которого определяется косинусом угла между вектором скорости движения воздуха и осью вскрывающей штольни.

Потребность организмом человека атмосферного кислорода с повышением геодезической высоты над уровнем моря компенсируется повышением частоты дыхания соразмерного коэффициенту высокогорья.

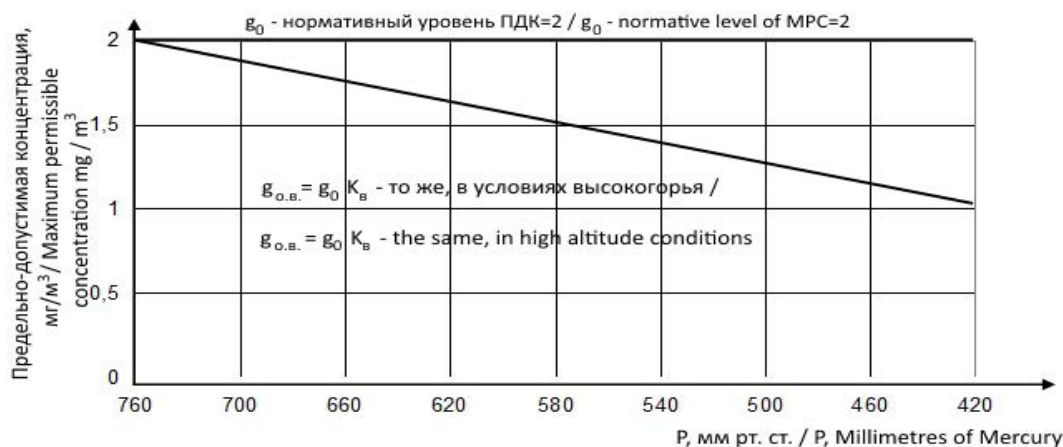


Рис. 1. Изменение ПДК пыли в воздухе рабочей зоны в условиях пониженного барометрического давления (высокогорные условия) /  
 Fig. 1. Variation of dust MPC in the air of the workspace under the conditions of low barometric pressure (high-altitude conditions)

Учащенное дыхание человека в условиях пониженного барометрического давления приводит к снижению резистентности организма, и, следовательно, к снижению его работоспособности.

Создаваемый в штольнях напор за счет скорости ветра на поверхности зависит от угла между вектором ветрового потока и осью вскрывающей горной выработки.

Величина барометрического коэффициента пропорционально геодезической высоте расположения штольни от уровня моря и температуры наружного воздуха.

Нормируемая концентрация пыли в атмосферном воздухе зависит от барометрического давления атмосферы и находится в прямой зависимости от геодезической высоты над уровнем моря.

Учреждениям санитарно-эпидемиологического надзора России рекомендовать внести коррективы при нормировании вредных веществ в рабочей среде и в селитебных зонах с учетом фактора барометрического давления.

## Литература

1. Алборов И. Д. Влияние естественной тяги на надежность проветривания рудника «Молибден». // Колыма. – 1986. – № 5. – С. 11-13.
2. Алборов И. Д., Хадзарагов А. П. К вопросу о пылевой нагрузке на легкие человека в условиях высокогорья. // Колыма. – 1978. – № 1. – С. 12-15.
3. Алексеенко В. А. Эколого-геохимический анализ регионального распределения тяжелых металлов в различных ярусах ландшафтов Северного Кавказа. / В. А. Алексеенко, В. В. Дьяченко, А. И. Нарезный, А. В. Суворинов. // Экологическая геофизика и геохимия: труды международной конференции. – Дубна, 1998. – С. 23-29.
4. Архангельский, В. И. Гигиена и экология человека: Учебник. / В. И. Архангельский, В. Ф. Кириллов. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2017. – 176 с.
5. Воропаев А. Ф. Тепловая депрессия шахтной вентиляции. – Л.: Изд. АН СССР, 1950. – 565 с.
6. Воропаев А. Ф. Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах. – М.: Недра, 1966. – 250 с.
7. Гончаренко С. Н., Коростелев Д. Б. Системный анализ и прогноз показателей и индикаторов эффективной деятельности в сфере охраны окружающей среды и природопользования. // ГИАБ. – 2018. – № 9. – С. 104-110.

8. Закон Республики Северная Осетия-Алания от 30.12.1998 N 30-РЗ «О горных территориях в Республике Северная Осетия-Алания».
9. Иванов А. В., Стриженко А. В., Супрун И. К. Вопросы оценки эффективности внедряемых пылезащитных экранов на этапе проектирования. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2020. – Т. 10. №3. – С. 139-151. DOI: 10.46698/VNC.2020.37.81.009
10. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. – М.: Гидрометеоздат, 1984. – 560 с.
11. Калугов Д. Р., Юков В. А. О принципах перехода горнорудных предприятий к устойчивому экологическому сбалансированному развитию. // *ГИАБ*. – 2020. – №3. – С. 74-86.
12. Колесов Е. В. Разработка методики расчета количества воздуха, требуемого для проветривания тупиковых проходческих выработок после взрывных работ. // *Горный журнал*. – 2019. – №3. – С. 80-84.
13. Комаров В. Б., Килькеев Ш. Х. Рудничная вентиляция. – М.: Металлургиздат, 1969. – С. 8.
14. Крымская, И. Г. Гигиена и экология человека: Учебное пособие. / И. Г. Крымская. – Рн/Д: Феникс, 2017. – 351 с.
15. Медведев Б. И., Гушин А. М., Лобов В. Л. Естественная тяга глубоких шахт. – М.: Недра, 1985. – 77 с.
16. Романченко С. Б. Управление аэропылединамическими процессами при подземной угледобыче. // *Горный журнал*. – 2014. – №5. – С. 298-333.
17. Черкашин В. И., Газалиев И. М. Перспективы освоения рудных месторождений Дагестана (экологические аспекты). // *Геология и геофизика Юга России*. – 2016. – №1. – С. 132-140.
18. Экология. / Под ред. проф. В. В. Денисова. – Рн/Д.: ИКЦ «MapT», 2016. – 768 с.
19. Bernardo P. M., da Gama C. D. A methodology for design and simulation of mine ventilation networks. // *Proceedings of the 6th international mine ventilation congress. 6<sup>th</sup> International Mine Ventilation Congress (IMVC), Pittsburgh, Pa, May 17-22 1997.*
20. Carriere R., McGuire C., McLaren E., Witow D. Studying operational improvements in blast gas clearing using ventilation control. // *Proceedings of the 16<sup>th</sup> North American Mine Ventilation Symposium*. – 2017. – pp. 19.7-19.16.
21. Castilla-Gomez J., Herrera-Herbert J., Campillos-Prieto A. Sgem Modelling and optimization of a ventilation network in underground mines. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. // Science and technologies in geology, exploration and mining, sgem 2015, vol iii. 15<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM), Albena, Bulgaria, 2015, Jun 18-24.*
22. Dziurzynski W., Krach A., Palka T. A reliable method of completing and compensating the results of measurements of flow parameters in a network of headings. // *Archives of Mining Sciences*. – 2015. – Vol. 60 (1). – pp. 3-24. <https://doi.org/10.1515/amsc-2015-0001>
23. Dziurzynski W., Krach A., Palka T. Airflow Sensitivity Assessment Based on Underground Mine Ventilation Systems Modeling. // *Energies*. – 2017. – Vol. 10 (10). Article 1451. <https://doi.org/10.3390/en10101451>
24. Gangrade V., Schatzel S. J., Harteis S. P., Addis, J. D. Investigating the Impact of Caving on Longwall Mine Ventilation Using Scaled Physical Modeling. // *Mining Metallurgy & Exploration*. – 2019. – Vol. 36 (4). – pp. 729-740. <https://doi.org/10.1007/s42461-019-0065-7>
25. Jha A. K. Ventilation Network Analysis. In *Selection of Main Mechanical Ventilators for Underground Coal Mines: a Case Study*. – 2017. – pp. 7-15. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56859-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56859-1_2)
26. Kobylkin S. S., Kharisov A. R. Design features of coal mines ventilation using a room-and-pillar development system. // *Journal of Mining Institute*. – 2020. – Vol. 245. – pp. 531-538. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.5.4>
27. Krach A. Node method for solving the mine ventilation networks. // *Archives of Mining Sciences*. – 2011. – Vol. 56 (4). – pp. 601-620.

28. Li B. R., Masahiro I., Shen S. B. Mine Ventilation Network Optimization Based on Airflow Asymptotic Calculation Method. // *Journal of Mining Science*. – 2018. – Vol. 54 (1). – pp. 99-110. <https://doi.org/10.1134/s1062739118013413>
29. Liu H., Mao S.J., Li M., Lyu P.Y. A GIS Based Unsteady Network Model and System Applications for Intelligent Mine Ventilation. // *Discrete Dynamics in Nature and Society*. – 2020. – Article 1041927. <https://doi.org/10.1155/2020/1041927>
30. Maleki S., Sotoudeh F., Sereshki F. Application of VENTSIM 3D and mathematical programming to optimize underground mine ventilation network: A case study. // *Journal of Mining and Environment*. – 2018. – Vol. 9 (3). – pp. 741-752. <https://doi.org/10.22044/jme.2018.6793.1503>
31. Morar M.S., Radu S.M., Cioclea D., Gherghe I. Use of IT equipment and specialized programs for solving ventilation networks. // *Quality-Access to Success*. – 2017. – Vol. 18. – pp. 121-126.
32. Nyaaba W., Frimpong S., El-Nagdy K.A. Optimisation of mine ventilation networks using the Lagrangian algorithm for equality constraints. // *International Journal of Mining Reclamation and Environment*. – 2015. – Vol. 29 (3). – pp. 201-212. <https://doi.org/10.1080/17480930.2014.942449>
33. Rezaei Z., Ataee-pour M., Madani H. Application of cut set method to reliability evaluation of mine ventilation networks. *Journal of Mining and Environment*. – 2015. – Vol. 10 (4). – pp. 947 – +. <https://doi.org/10.22044/jme.2019.8440.1722>
34. Roghanch P., Kocsis K.C. Improving the climatic conditions in development and production workings of hot underground mines by redesigning the auxiliary ventilation system: a case study. // *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. – 2017. – Vol. 8. No. 4. – pp. 280-293.
35. Sarac S., Sensogut C. A combined method for the analysis of mine ventilation networks. // *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2000. – Vol. 100 (6). – pp. 371-373.
36. Suvar M., Cioclea D., Gherghe I., Pasculescu V.M. Advanced software for mine ventilation networks solving. // *Environmental Engineering and Management Journal*. – 2012. – Vol. 11 (7). – pp. 1235-1239. <https://doi.org/10.30638/eemj.2012.149>
37. Suvar M.C., Arad V., Lupu C., Cioclea D., Ghicioi E., Vlasin N.I., Sgem. (2013, Jun 16-22). Prospective virtual simulation of ventilation networks. // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM [Geoconference on science and technologies in geology, exploration and mining, sgem 2013, vol i]. 13<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2013, Albena, BULGARIA*.
38. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G. P., Nikolaev A. V., Ginzburg A. A. Complex Environmental Monitoring in Russia and India. // *Geology of the South of Russia*. – 2019. – Vol. 9. No. 4. – pp. 87-101.
39. Tariq F., Bekir G. Evaluation of line brattice length in an empty heading to improve air flow rate at the face using CFD. // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2017. – Vol. 27. No. 2. – pp. 253-259.
40. Wu F.I., Luo Y., Chang X.T. Coupling simulation model between mine ventilation network and gob flow field. // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2019. – Vol. 119 (10). – pp. 783-792. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/102/2019>

## References

1. Alborov I. D. Influence of natural draft on the ventilation reliability of the “Molybdenum” mine. *Kolyma*, 1986. No. 5. pp. 11-13. (In Russ.)
2. Alborov I. D., Khadzaragov A. P. On the issue of dust load on human lungs in high altitude conditions. *Kolyma*, 1978. No. 1. pp. 12-15. (In Russ.)
3. Alekseenko V.A. Ecological and geochemical analysis of the regional distribution of heavy metals in various layers of the landscapes in the North Caucasus. In: *Environmental Geophysics*

and Geochemistry: Proceedings of the International Conference. Dubna, 1998. pp. 23-29. (In Russ.)

4. Arkhangel'skii V.I., Kirillov V.F. Hygiene and human ecology: Textbook. Moscow. GEOTAR-Media, 2017. 176 p. (In Russ.)

5. Voropaev A.F. Thermal depression of mine ventilation. Leningrad. Ed. Academy of Sciences of the USSR, 1950. 565 p. (In Russ.)

6. Voropaev A. F. The theory of heat exchange of mine air and rocks in deep mines. Moscow. Nedra, 1966. 250 p. (In Russ.)

7. Goncharenko S.N., Korostelev D.B. System analysis and forecast of measures and indicators of effective activities in the field of environmental protection and nature management. GIAB, 2018. No. 9. pp. 104-110. (In Russ.)

8. Law of the Republic of North Ossetia-Alania from 30.12.1998 N 30-RZ "On mountain territories in the Republic of North Ossetia-Alania". (In Russ.)

9. Ivanov A. V., Strizhenok A. V., Suprun I.K. Issues of evaluating the effectiveness of the introduced dust screens at the design stage. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2020. Vol. 10. No. 3. pp. 139-151. DOI: 10.46698/VNC.2020.37.81.009 (In Russ.)

10. Izrael Yu.A. Ecology and control of the state of the natural environment. Moscow. Gidrometeoizdat, 1984. 560 p. (In Russ.)

11. Kalugov D. R., Yukov V.A. On the principles of the transition of mining enterprises to sustainable ecological balanced development. *GIAB*, 2020. No. 3. pp. 74-86. (In Russ.)

12. Kolesov E. V. Development of a methodology for calculating the amount of air required for ventilation of dead-end tunneling workings after blasting operations. *Mining journal*, 2019. No. 3. pp. 80-84. (In Russ.)

13. Komarov V.B., Kilkeev Sh.Kh. Mine ventilation. Moscow. Metallurgizdat, 1969. p. 8. (In Russ.)

14. Krymskaya I. G. Hygiene and human ecology. Textbook. Phenix, 2017. 351 p. (In Russ.)

15. Medvedev B. I., Gushchin A. M., Lobov V. L. Natural draft of deep mines. Moscow. Nedra, 1985. 77 p. (In Russ.)

16. Romanchenko S.B. Control of aerial-dynamic processes in underground coal mining. *Mining journal*, 2014. No. 5. pp. 298-333. (In Russ.)

17. Cherkashin V. I., Gazaliev I. M. Prospects for the development of ore deposits in Dagestan (environmental aspects). *Geology and Geophysics of Russian South*, 2016. No. 1. pp. 132-140. (In Russ.)

18. Ecology. Ed. prof. V.V. Denisov. Rn/D. IKC "MarT", 2016. 768 p. (In Russ.)

19. Bernardo, P. M., & daGama, C.D. A methodology for design and simulation of mine ventilation networks. Proceedings of the 6th international mine ventilation congress. 6<sup>th</sup> International Mine Ventilation Congress (IMVC), Pittsburgh, Pa, May 17-22 1997.

20. Carriere R., McGuire C., McLaren E., Witow D. Studying operational improvements in blast gas clearing using ventilation control. In: Proceedings of the 16<sup>th</sup> North American Mine Ventilation Symposium, 2017. pp. 19.7-19.16.

21. Castilla-Gomez J., Herrera-Herbert J., Campillos-Prieto A. Sgem Modelling and optimization of a ventilation network in underground mines. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. Science and technologies in geology, exploration and mining, sgem 2015, vol iii. 15<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM), Albena, Bulgaria, 2015, Jun 18-24.

22. Dziurzynski W., Krach A., Palka T. A reliable method of completing and compensating the results of measurements of flow parameters in a network of headings. *Archives of Mining Sciences*, 2015. Vol. 60 (1). pp. 3-24. <https://doi.org/10.1515/amsc-2015-0001>

23. Dziurzynski W., Krach A., Palka T. Airflow Sensitivity Assessment Based on Underground Mine Ventilation Systems Modeling. *Energies*, 2017. Vol. 10 (10). Article 1451. <https://doi.org/10.3390/en10101451>

24. Gangrade V., Schatzel S. J., Harteis S. P., Addis, J. D. Investigating the Impact of Caving on Longwall Mine Ventilation Using Scaled Physical Modeling. *Mining Metallurgy & Exploration*, 2019. Vol. 36 (4). pp. 729-740. <https://doi.org/10.1007/s42461-019-0065-7>

25. Jha A.K. Ventilation Network Analysis. In Selection of Main Mechanical Ventilators for Underground Coal Mines: a Case Study, 2017. pp. 7-15. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56859-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56859-1_2)
26. Kobylkin S.S., Kharisov A.R. Design features of coal mines ventilation using a room-and-pillar development system. Journal of Mining Institute, 2020. Vol. 245. pp. 531-538. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.5.4>
27. Krach A. Node method for solving the mine ventilation networks. Archives of Mining Sciences, 2011. Vol. 56 (4). pp. 601-620.
28. Li B.R., Masahiro I., Shen S.B. Mine Ventilation Network Optimization Based on Airflow Asymptotic Calculation Method. Journal of Mining Science, 2018. Vol. 54 (1). pp. 99-110. <https://doi.org/10.1134/s1062739118013413>
29. Liu H., Mao S.J., Li M., Lyu P.Y. A GIS Based Unsteady Network Model and System Applications for Intelligent Mine Ventilation. Discrete Dynamics in Nature and Society. 2020. Article 1041927. <https://doi.org/10.1155/2020/1041927>
30. Maleki S., Sotoudeh F., Sereshki F. Application of VENTSIM 3D and mathematical programming to optimize underground mine ventilation network: A case study. Journal of Mining and Environment. 2018. Vol. 9 (3). pp. 741-752. <https://doi.org/10.22044/jme.2018.6793.1503>
31. Morar M.S., Radu S.M., Cioclea D., Gherghe I. Use of IT equipment and specialized programs for solving ventilation networks. Quality-Access to Success. 2017. Vol. 18. pp. 121-126.
32. Nyaaba W., Frimpong S., El-Nagdy K.A. Optimisation of mine ventilation networks using the Lagrangian algorithm for equality constraints. International Journal of Mining Reclamation and Environment. 2015. Vol. 29 (3). pp. 201-212. <https://doi.org/10.1080/17480930.2014.942449>
33. Rezaei Z., Ataee-pour M., Madani H. Application of cut set method to reliability evaluation of mine ventilation networks. Journal of Mining and Environment, 2015. Vol. 10 (4). pp. 947-+. <https://doi.org/10.22044/jme.2019.8440.1722>
34. Roghanch P., Kocsis K.C. Improving the climatic conditions in development and production workings of hot underground mines by redesigning the auxiliary ventilation system: a case study. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 2017. Vol. 8. No. 4. pp. 280-293.
35. Sarac S., Sensogut C. A combined method for the analysis of mine ventilation networks. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2000. Vol. 100 (6). pp. 371-373.
36. Suvar M., Cioclea D., Gherghe I., Pasculescu V.M. Advanced software for mine ventilation networks solving. Environmental Engineering and Management Journal, 2012. Vol. 11 (7). pp. 1235-1239. <https://doi.org/10.30638/eemj.2012.149>
37. Suvar M.C., Arad V., Lupu C., Cioclea D., Ghicioi E., Vlasin N.I., Sgem. (2013, Jun 16-22). Prospective virtual simulation of ventilation networks. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM [Geoconference on science and technologies in geology, exploration and mining, sgem 2013, vol i]. 13<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2013, Albena, BULGARIA.
38. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Nikolaev A.V., Ginzburg A.A. Complex Environmental Monitoring in Russia and India. Geology of the South of Russia, 2019. Vol. 9. No. 4. pp. 87-101.
39. Tariq F., Bekir G. Evaluation of line brattice length in an empty heading to improve air flow rate at the face using CFD. International Journal of Mining Science and Technology, 2017. Vol. 27. No. 2. pp. 253-259.
40. Wu F.I., Luo Y., Chang X.T. Coupling simulation model between mine ventilation network and gob flow field. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2019. Vol. 119 (10). pp. 783-792. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/102/2019>



УДК 551.49

DOI: [10.46698/VNC.2021.61.12.013](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.61.12.013)

Оригинальная статья

## Освоение месторождений подземных вод инжекторно-принудительным способом

Т. Н. Мендебаев<sup>1</sup>, А. Я. Третьяк<sup>2</sup>, Н. Ж. Смашов<sup>1</sup>,  
А. В. Мохов<sup>2, 3</sup>, А. А. Бурцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-внедренческий центр Алмас, Казахстан, 05009, г. Алматы,  
Алматинский р-н, пр. Абая, д. 153, e-mail: nvc\_almas@mail.ru;

<sup>2</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
им. М. И. Платова, Россия, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск,  
ул. Просвещения, 132;

<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской  
академии наук, Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Чехова, 42

Статья поступила: 18.06.2021, доработана: 22.07.2021, принята к публикации: 10.08.2021

**Резюме:** Актуальность исследований. По данным международных центров потребление питьевой воды испытывает бурный рост. К 2025 году две трети населения планеты столкнутся с нехваткой пресной воды. В настоящее время одной из причин массовой миграции людей из развивающихся стран в Европу, США и Канаду является отсутствие постоянных источников питьевой воды. Пресная вода становится ключевым фактором геополитики 21 века. Использование главного ее источника – запасов недр – является востребованным и актуальным. **Целью исследования** является решение проблем эффективного извлечения подземных вод путем создания условий для нормального проявления внутренней энергии водоносных пластов в сочетании с физическими принципами отбора воды, а также возможности и целесообразности применения струй высокого давления в буровых долотах, армированных PDC, для бурения пород VII-VIII категорий по буримости. **Методы исследований:** использован экспериментально-аналитический метод исследований на экспериментальной установке циркуляционной системы с возможностью визуального наблюдения за режимом движения воды, а также установление ресурсных возможностей циркуляционной системы разработки залежей подземных вод инжекционно-принудительным самоизливом. Существующая методика разведки и освоения месторождений подземных вод бурением вертикальных скважин морально устарела. Применяемые способы проводки скважин в целом не соответствуют геолого-техническим условиям подземных водных объектов, что приводит к технологическим осложнениям и низкой водоотдаче массива. Повышение эффективности вскрытия и освоения залежей подземных вод достигается при создании условий для проявления внутренней энергии водоносных пластов в сочетании с физическими принципами отбора воды и подъема ее на высоту без затрат энергии. **Результаты исследований.** На основании анализа и обобщения результатов аналитических и лабораторных исследований ресурсных возможностей предложена циркуляционная система разработки залежей подземных вод инжекционно-принудительным самоизливом; установлена целесообразность оснащения нисходящего ствола компоновкой гидроструйного аппарата, ориентированного на элементы залегания водоносных пластов. Зарождение неполного гидроудара в компоновке гидроструйного гидроаппарата создает динамическую депрессию на водоносные пласты с эффектом инъекции и силы гидротарана. Предлагаемая циркуляционная система может быть использована для извлечения воды из низконапорных водоносных пластов.

**Ключевые слова:** внутренняя энергия водоносных пластов, физические принципы подъема воды на высоту, циркуляционная система, нисходящие и восходящие стволы, водоподъемная труба, неполный гидроудар, гидроструйный аппарат.

**Для цитирования:** Мендебаев Т. Н., Третьяк А. Я., Смашов Н. Ж., Мохов А. В., Бурцев А. А. Освоение месторождений подземных вод инжекторно-принудительным способом. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (3): 160 – 171. DOI: [10.46698/VNC.2021.61.12.013](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.61.12.013).

DOI: [10.46698/VNC.2021.61.12.013](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.61.12.013)

Original paper

## Groundwater deposits development by the injector-forced method

T. N. Mendebaev<sup>1</sup>, A. Y. Tret`yak<sup>2</sup>, N. Z. Smashov<sup>1</sup>,  
A. V. Mokhov<sup>2, 3</sup>, A. A. Burcev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Innovative center Almas, 153 Abai ave., Almaty district, Almaty05009, Kazakhstan,  
e-mail: nvc\_almas@mail.ru;

<sup>2</sup>Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132 Prosveshcheniya Str.,  
Novocherkassk 346428, Russian Federation;

<sup>3</sup>Federal Research Centre of the Southern Scientific Center of the Russian Academy  
of Sciences, 41, Chehova street, Rostov-na-Donu344006, Russian Federation

Received: 18.06.2021, revised: 22.07.2021, accepted: 10.08.2021

**Abstract: Relevance.** According to data of the international global economy research centers, 5,5 bln people or two-thirds of the world population will run into a fresh water shortages problem in 2025. Now the major reason for mass human migration from African countries to Europa, USA and Canadais the drinking water sources failure and as a result the poor living standard. In the next 65 years drinking water consumption will grow exponentially. The drinking water is a key to geopolitics of XXI century. So groundwater extraction development questions are eagerly sought and important now. **The Aim of research** is to take on the task of effective groundwater extraction while creating conditions for the normal manifestation of the internal energy of aquifers in combination with the physical principles of water withdrawal, as well as the possibility and feasibility of using high-pressure jets in PDC drilling bits for drilling rocks of VII-VIII drillability grades. **Methods.** We practiced the experimental-analytical method using an experimental observable circulating system set-up supporting visual observations of the water motion mode as well as the establishment of the resource capabilities of the circulation system for the development of underground water deposits by injection-forced self-pouring. The existing methodology for exploration and development of groundwater deposits by drilling vertical wells is obsolete. The applied method of drilling wells does not correspond to the geological and technical conditions of the mountainous environment, hence the technological complications and low fluid yield of hydrological wells. Improving the efficiency of opening and developing groundwater deposits is an urgent task. And this is possible when creating conditions for the presentation of the internal energy of aquifers in combination with the physical principles of water extraction and its rise to a height without energy expenditure. **Results.** According to the analysis and generalization of the results of analytical and laboratory studies of resource capabilities, a circulation system for the development of underground water deposits by injection-forced self-flow is proposed. The expediency of equipping the descending shaft with the layout of the hydraulic jet apparatus, oriented to the elements of occurrence of aquifers, has been established. The initiation of an incomplete water hammer in the layout of a hydraulic jet hydraulic device creates a dynamic depression on the aquifers with the effect of injection and the force of a hydraulic ram. The proposed circulation system can be used to extract water from low-pressure aquifers.

**Keywords:** water bearing bed internal energy, physical principles of water exaltation, a circulation system, topdown and uprise holes, column pipe, partial hydroshock, hydrjet vessel.

**For citation:** Mendebaev T. N., Tret`yak A. Y., Smashov N. Z., Mokhov A. V., Burcev A. A. Groundwater deposits development by the injector-forced method. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (3): 160 – 171. DOI: 10.46698/VNC.2021.61.12.013.

## Введение

Во всем мире истощаются запасы месторождений подземных вод, особенно в районах интенсивного недропользования. Горные работы уходят вглубь земли, что сопровождается нарушением геодинамики недр и системы жизнеобеспечения водоносных горизонтов, их загрязнением промышленными и бытовыми отходами [Гавришин, 2020].

Необходим принципиально новый подход к решению проблем сохранения и освоения месторождений подземных вод. Традиционная методика разведки и разработки залежей, представляющая собой частоконвергентную вертикальную скважину морально устарела, не отвечает требованиям недросбережения и рыночной экономики [Башкатов, 1979].

Недостатки – основной объем бурения скважин приходится на пустые породы при незначительной площади вскрытия водоносных пластов на величину их мощности по вертикали, отсюда низкая водоотдача. Другая проблема – необходимость использования для извлечения воды глубинных насосов, воздушных эрлифтов, энергозатратных в эксплуатации, сложных в обслуживании и ремонте.

Решение проблем эффективного извлечения подземных вод возможно при создании условий для максимального проявления внутренней энергии водоносных пластов в сочетании с физическими принципами отбора воды и подъема ее на высоту [Гридневский, 2019].

На этой идейной основе, с учетом элементов залегания водоносных пластов, направления движения воды в них, сформирована циркуляционная система разработки залежей подземных вод инъекционно-принудительным самоизливом.

## Общие сведения об объекте исследования

Структурно циркуляционная система скважин состоит из наклонно проведенных во встречном направлении нисходящего и восходящего стволов, связанных плавным изгибом на глубине. Стволы обсажены фильтровой колонной труб со сбойкой встык на плавном изгибе. Система оснащена наземной емкостью, в восходящем стволе размещена водоподъемная труба с боковыми каналами, в нисходящем стволе установлена компоновка каскада гидроструйного аппарата, содержащего насадки, приемные камеры, камеры смешения и диффузор. Вход компоновки гидравлически связан с наземной емкостью, выход в виде диффузора введен в водоподъемную трубу, причем связка насадки – приемная камера ориентирована на подошву залежей подземных вод [Mendebaev et al., 2019b].

В таком исполнении связанные стволы скважин и компоновка каскада гидроструйного аппарата в совокупности образуют циркуляционную систему отбора воды из водоносных пластов посредством инъекции и подъема на высоту силой гидротарана.

Объекты исследования – гидродинамика потока воды через компоновку каскада гидроструйного аппарата, конструктивные особенности и технологические возможности средств сооружения скважин, установление критического расхода воды в водоподъемной трубе, при котором нарушается ламинарный режим движения.

Кроме гидродинамических характеристик водоносных пластов, структуры циркуляционной системы и средств ее сооружения, эффективность извлечения подзем-

ных вод принудительным самоизливом определяется силами инжекции и гидротарана, присущими гидроструйному аппарату.

В области гидравлики гидромашин имеется множество исследований и разработок, направленных на совершенствование конструкции и улучшение показателей работы эжекторов, повышение силовых характеристик гидротаранных установок при подъеме воды на высоту [Mendebaev et al., 2019b].

### Методы исследования

Разработана методика расчета высокопроизводительных эжекторов, где установлены оптимальные соотношения продольных размеров внутреннего сечения составляющих элементов, обеспечивающие повышение значения коэффициента эжекции [Горбунов и др., 2018].

Напорно-энергетические характеристики эжекторов улучшаются с увеличением минерализации рабочей жидкости. Это указывает на выгодность использования эффекта инжекции при извлечении высокоминерализованных подземных вод [Дроздов и др., 2019; Ксенз и др., 2016].

Разработаны конструкции эжекторов с возможностью насыщения рабочего раствора пузырьками воздуха, чем достигнуто сокращение расхода воды до 18-25% по сравнению со стандартными методами опрыскивания [Ксенз и др., 2016].

В исследовании [Besaghi, 2019] обсуждаются направления будущих научных поисков для решения проблем «многомерного эжектора» в различных областях человеческой деятельности.

Есть работа, в которой изучены эффекты турбулентности и ее влияние на динамику и скорость газовой индукции в эжекторе [Deerankar et al., 2018].

С целью повышения эффективности эжектора, предложен вариант исполнения побудительного устройства в конструкции в виде вращающегося сопла, чем достигается максимальный прирост КПД на 37% [Исмагилов и др., 2017].

Гидротаран – самонастраивающееся автоколебательное устройство, преобразующее кинетическую энергию части воды, поступающей в него, в потенциальную энергию избыточного давления за счет периодически повторяющегося гидравлического удара. Термином «гидравлический удар» обозначают как повышение, так и понижение давления [Людеке и др., 2015].

Гидротараны могут быть использованы в низконапорных гидроузлах. Известны конструкции гидротаранов зарубежных фирм, исследования характеристик которых проводились при питательном напоре 3 м [Саплин и др., 2015].

Исследователи, занимающиеся разработкой гидротарана пришли к выводу, что оптимальная длина нагнетательной трубы должна составлять не менее 10 метров. Объясняется это тем, что для гидроудара способного поднять поток жидкости на высоту, должна быть соответствующая масса потока [Галингер, 2011].

В работах [Diwan et al., 2016; Vang et al., 2014; Grygo, 2016; Guo et al., 2018] приведены принципы проектирования гидравлического тарана, сведения об оптимальном дизайне, и результаты анализа производительности гидравлической таранной системы, влияния высоты подачи воды на производительность, конструкции и характеристики нового гидравлического тарана.

### Экспериментальная установка добычи подземных вод инжекционно-принудительным способом

На основании передовых идей в области разработки и эксплуатации эжекторов и гидротарана, была сконструирована компоновка каскада гидроструйного аппарата, встроенная в циркуляционную систему скважин.

Главные отличия от известных конструкций эжекторов и гидротарана, компоновка каскада гидроструйного аппарата одновременно выполняет функцию эжектора гидротарана, предусматривает зарождения неполного гидравлического удара, оказывающего знакопеременные гидродинамические воздействия на водоносные

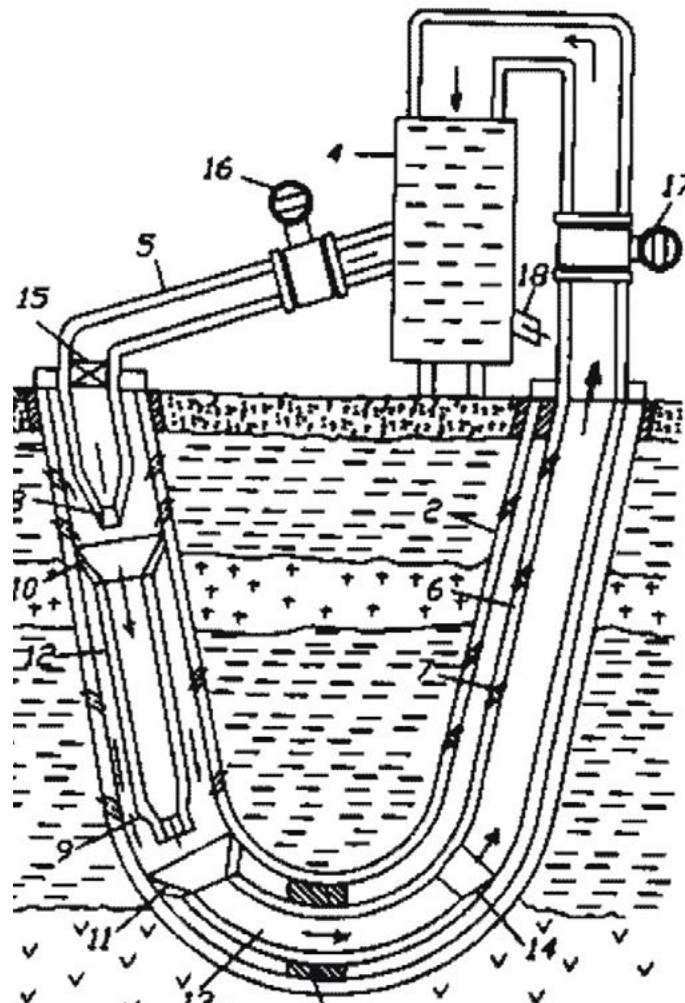


Рис. 1. Циркуляционная система разработки залежей подземных вод  
инжекционно-принудительным способом

1 – колонна труб нисходящего ствола, 2 – колонна труб восходящего ствола, 3 – направляющая,  
4 – наземная емкость, 5 – трубопровод, 6 – водоподъемная труба, 7 – боковые каналы, 8 – насадка  
диффузора, 9 – сопло диффузора, 10-11 – приемные камеры, 12-13 – камеры смешения,  
14 – диффузор, 15 – вентиль, 16-17 – расходомеры, 18 – патрубок к потребителю /

Fig. 1. The circulating system of the subsurface waters mining by the injector-forced method  
1 - pipe column of the topdown hole, 2 - pipe column of the uprise hole, 3 - guide arch, 4 - aboveground  
tank, 5 - flowline, 6 - column pipe, 7 - lateral channel, 8 - diffuser header, 9 - diffusor nose piece,  
10-11 - suction chamber, 12-13 - mixing chamber, 14 - diffuser, 15 - stopper, 16-17 - flow gauges,  
18 - pipe to interruptible customer

пласты. На рисунке 1 приведена циркуляционная система разработки залежей подземных вод инъекционно-принудительным самоизливом.

Работает система следующим образом. При открытии вентиля (15) рабочий поток воды из наземной емкости (4) по трубопроводу (5) через насадки (8) поступает в приемную камеру (10), увлекая массы воды за счет трения из водоносного пласта через фильтровую колонну труб (1) нисходящего ствола. Увлеченный поток называется инжектируемым, где кинетическая энергия воды из емкости (4) частично передается инжектируемому. Рабочий и инжектируемый потоки поступают в камеру смешения (12), где скорости их выравниваются, что сопровождается, как правило, повышением давления. Из камеры смешения поток поступает в приемную камеру (11), увлекая массу воды из нижележащего водоносного пласта. Далее поток перетекает в камеру смешения (13), где их скорости вновь выравниваются с повышением давления. Из камеры смешения (13) по направляющей (3) вода поступает в диффузор (14), где происходит дальнейший рост давления. Давление смешанного потока на выходе из диффузора значительно выше давления инжектируемого потока, поступающего в приемную камеру (10).

В дальнейшем высоконапорный скоростной поток, посредством инъекции однонаправленно увлекая воду через фильтровую колонну труб (2) восходящего ствола, по водоподъемной трубе (6) с боковыми каналами (7) попадает в наземную емкость (4). По разности показаний расходомеров (16 и 17) определяют объем инжектируемой воды, через патрубок (18) направляемой к потребителям.

Повышение давления инжектируемого потока без непосредственной затраты механической энергии – основное качество гидроструйных аппаратов [Дерусов, 1984; Соколов, Зигнер, 1989]. В силу этого компоновка каскада гидроструйного аппарата представляется более надежным средством отбора воды из водоносных пластов и подъема на высоту, по сравнению с глубинными, механическими насосами.

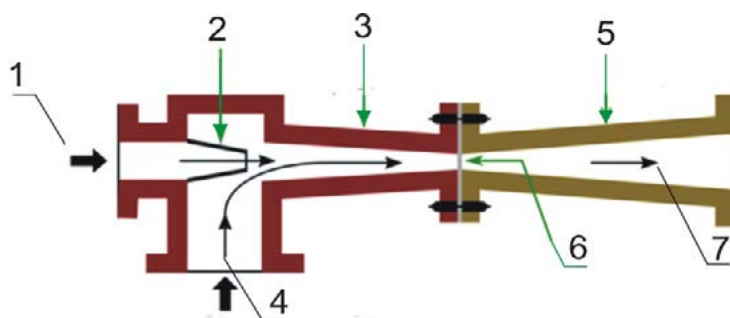


Рис. 2. Схема работы гидроструйного насоса

1 – движущаяся жидкость, 2 – сопло движущейся жидкости, 3 – сходящееся входное сопло, 4 – прокачиваемая жидкость, 5 – диффузор, 6 – горловина диффузора, 7 – движущая жидкость на выходе /

Fig. 2. Waterjet pump run scema

1 – motive fluid, 2 – motive fluid slush nozzle, 3 – converginginput nozzle, 4 – circulatingfluid, 5 – diffusor, 6 – diffusormanhole, 7 – output motive fluid

При наличии в циркуляционной системе плавного изгиба между стволами переход воды из каскада гидроструйного аппарата в водоподъемную трубу происходит без потери напора и скорости, с приобретением дополнительного ускорения и усилением подъемной силы.

Энергетические характеристики каскада гидроструйного аппарата оцениваются величиной скоростного напора и коэффициентом инжекции  $K_u$ .

$$K_u = \frac{Q_u}{Q_p}, \%$$

где  $Q_u$  – расход инжектируемого потока воды,  $Q_p$  – расход рабочего потока воды. Значение скоростного напора потока воды в водоподъемной трубе определяется по формуле

$$H = \frac{P}{\gamma} + \frac{g^2}{2q}, \text{ м}$$

где  $P$  – давление воды на выходе из диффузора,  $\gamma$  – объемный вес воды,  $g$  – скорость движения потока воды в водоподъемной трубе.

### Методы работы

Процесс перетекания воды через компоновку каскада гидроструйного аппарата сопровождается зарождением неполного гидравлического удара. При поступлении потока воды в насадки из-за резкого уменьшения поперечных размеров насадки на выходе часть потока воды задерживается, появляются волны повышенного давления, следующие одна за другой по трубопроводу в сторону емкости. Как только первая волна положительного давления дойдет до емкости, поток разожмется, часть воды выльется в емкость, в этом месте возникает отраженная отрицательная волна. К этому моменту, к емкости подходит вторая волна повышенного давления от нижней насадки. Волны смешиваются, и суммарная отрицательная волна давлением движется от емкости к насадкам, где вновь зарождаются волны повышенного давления. Цикл повторяется.

При этом гидравлический удар называется неполным, поскольку выходы насадки остаются открытыми. Если волна повышенного положительного давления будет направлена на увеличение силы гидротарана, то последующая, отраженная от емкости отрицательная волна может создать вакуум на связке насадка-приемная камера, способствуя раскрытию пор и трещин пород. При этом будет наблюдаться увеличение водоотдачи пласта. Таким образом, возможности гидравлического удара используются для создания динамических депрессий на водоносные пласты.

Слежение за направлением трассы стволов, их сбойки плавным изгибом встык осуществляется системой контрольно-измерительных приборов, скважинной телеметрией ССВ-01.

Для изучения механизма зарождения неполного гидравлического удара и проверки состоятельности циркуляционной системы, придерживаясь схемы приведенной на рисунке и в соответствии с принципами физического моделирования гидравлических явлений, спроектирована экспериментальная установка.

Проведением серии экспериментов на установке с изменениями соотношения расхода рабочего потока и поперечных размеров выходной части насадок удалось установить границы зарождения неполного гидравлического удара в условиях, приближенных к реальным.

Внешние признаки – переход экспериментальной установки в резонансный, автоколебательный режим работы, пульсирующий подъем воды на дневную поверхность.

Безусловно, изучение механизма зарождения неполного, каскадного гидравлического удара в компоновке гидроструйного аппарата, динамики знакопеременного

взаимодействия с водоносными пластами требует проведения объемных исследований. Однако есть уверенность, что регулируемый-гидравлический удар может стать весомым ресурсом повышения эффективности циркуляционной системы извлечения подземных вод.

В установлении ресурсных возможностей повышения эффективности циркуляционной системы также важно изучение возможностей создания стабильного ламинарного режима движения потока воды в водоподъемной трубе. При турбулентном режиме движения сопротивление пропорционально квадрату скорости течения с увеличением энергозатрат и снижением высоты подъема воды.

Критический расход, при котором режим движения потока воды отклоняется от ламинарного течения в трубах, рассчитывают по формуле

$$Q = 0,182 dv$$

где  $Q$  – критический расход, л/с,  $d$  – внутренний диаметр труб, см,  $v$  – кинематический коэффициент вязкости, см<sup>2</sup>/сек.

Для установления достоверных граничных значений сохранения ламинарного режима течения воды в водоподъемной трубе были проведены опытные работы на экспериментальной установке. В повариантном исполнении, с целью визуального наблюдения за режимом движения воды, использована водоподъемная труба с прозрачными стенками, на емкость сверху был установлен бачок с красной краской, подаваемой в емкость через вентиль и патрубок. Расходы воды определялись по показаниям расходомера, вмонтированного в водоподъемную трубу перед входом в емкость.

Ниже, в таблице 1, приведены результаты расчетов и данные экспериментов по определению критического расхода потока воды, при которых режим движения отклоняется от ламинарного.

Таблица 1 / Table 1

**Значение критического расхода отклонения воды от ламинарного движения в зависимости от внутреннего диаметра водоподъемной трубы /**

**The value of the critical flow rate of the water deflection from laminar movement, depending on the inner diameter of the riser pipe**

Кинематическая вязкость воды при температуре 20°C равняется 0,01006 см<sup>2</sup>/сек. / The kinematic viscosity of water at a temperature of 20°C is equal to 0.01006 cm<sup>2</sup>/sec.

Показатели критического расхода воды, Q, л/мин / Indicators of critical water consumption, Q, l/min	Внутренний диаметр водоподъемной трубы геологоразведочного сортамента, мм / Inner diameter of the geological exploration assortment water-lifting pipe, mm			
	80	98	114	127
1.1. Расчетные / Calculated	8,788	10,765	12,523	14,281
1.2. Экспериментальные / Experimental	2,24	25,6	30,2	37,5



Результаты экспериментов сильно расходятся с расчетными данными критического расхода воды, что указывает на некорректность формулы расчета, которая не учитывает такие факторы влияющие на режим движения воды, как шероховатость внутренней стенки трубопровода. Возможно, на режим движения воды повлияли плавный изгиб между условными стволами и материал изготовления водоподъемной трубы из прозрачного стекла. Чем плавнее вход в трубу, тем позже наступает турбулентный режим [Рабинович, 1989]. Отсюда следует, что при проектировании циркуляционной системы разработки залежей подземных вод применительно к конкретной гидрогеологической ситуации необходимо руководствоваться результатами экспериментов [Третьяк и др., 2019а, б].

### Результаты и обсуждение

Выполненные экспериментальные исследования показывают, что циркуляционная система разработки подземных вод инъекционно-принудительным способом работоспособна и реализуема на практике.

Исходная идея, определяющая структуру циркуляционной системы – минимальный объем бурения скважин по пустым породам и максимальное вскрытие водоносных пластов, извлечение воды из недр земли без затрат энергии.

При непрерывной, замкнутой циркуляции потока воды по линии наземная емкость – компоновка каскада гидроструйного аппарата – водоносные пласты – водоподъемная труба – наземная емкость, давление воды в водоподъемной трубе значительно выше, чем в наземной емкости.

Весомый ресурс в повышении эффективности циркуляционной системы разработки залежей подземных вод – зарождение неполного, гидравлического удара с чередующимися повышением и понижением волны давления в компоновке каскада гидроструйного аппарата, усилением эффекта инъекции и силы гидротарана.

По технологическим возможностям, циркуляционная система может быть использована не только в напорных и артезианских водах, но и в низконапорных.

Предпочтительные материалы для изготовления техники бурения скважин, элементов гидроструйного аппарата – легкосплавные трубы, высокопрочные композиционные материалы, стойкие к знакопеременным нагрузкам и агрессивной водной среде.

Циркуляционная система разработки залежей подземных вод инъекционно-принудительным самоизливом по объему водоотдачи может заменить 3-5 вертикальных скважин, пробуренных по традиционной методике.

В перспективе, система может стать средством перевода сельского хозяйства страны на орошаемое земледелие, достижением огромной экономии водных ресурсов, решением проблем недросбережения и водной безопасности.

### Выводы

1. При непрерывной замкнутой циркуляции потока воды по линии наземная емкость – компоновка каскада гидроструйного аппарата – водоносные пласты – водоподъемная труба – наземная емкость давление воды в водонапорной трубе значительно выше, чем в наземной емкости.

2. Ресурсные возможности циркуляционной системы обусловлены оснащением нисходящего ствола компоновкой каскада гидроструйного аппарата, ориентированного на элементы залегания водоносных пластов. Зарождением неполного гидрав-

лического удара в компоновке каскада гидроструйного аппарата создается динамическая депрессия на водоносные пласты усилением эффекта инжекции и силы гидротарана, это доказано на экспериментальной установке. Возможности неполного гидравлического удара можно регулировать соотношениями расхода рабочего потока к поперечному размеру выходной части насадки. В силу данного ресурса циркуляционная система может быть использована для извлечения воды из низконапорных водоносных пластов.

3. Критические расходы потока воды в водоподъемной трубе определены расчетами и проведением экспериментов на установке, где водопроводная труба изготовлена из прозрачного материала. Это дало возможность визуального наблюдения за режимом течения потока воды.

4. Данные расчетов расхода воды и результаты экспериментов отличаются. Это связано с уменьшением шероховатости внутренней стенки из стекла, что задерживало появление турбулентного режима.

5. Установление закономерности режима движения воды может быть учтено при проектировании циркуляционной системы применительно к конкретным гидрогеологическим условиям залегания водоносных пластов.

## Литература

1. Башкатов Д.Н.. Справочник по бурению скважин на воду. – М.: Недра, 1979. – С. 478-482.
2. Гавришин А.И. Шахтные воды в управлении качеством грунтовых вод в восточном Донбассе. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №3. – С. 127-138. DOI: 10.46698/VNC.2020.62.81.008
3. Галинкер Э.В. Идеальный гидротаран. // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – № 11 (103). – С. 69-71.
4. Горбунов А.К., Петросян О.П., Рябченков Д.В. Эжекция и инжекция реагентов в технологиях подготовки. // В сб. статей Международной научно-практической конференции. – Уфа: Аэтерна, 2018. – С. 40-42.
5. Гридневский А.В. Численное моделирование геофильтрации правобережья реки Дон для обоснования инженерной защиты от подтопления в г. Ростов-на-Дону. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 1. – С. 150-163. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26795
6. Дерусов В.П. Обратная промывка при бурении геологоразведочных скважин. – М.: Недра, 1984. – С. 101-105.
7. Дроздов А.Н., Дроздов Н.А., Горбылева Я.А., Горелкина Е.И. Влияние эжекторов минерализации рабочей жидкости на характеристики жидкостно-газовых эжекторов. // Бурение и нефть. – 2019. – № 7-8. – с. 42-45.
8. Исмагилов А.Р., Спиридонов Е.К., Белкина О.В. О повышении эффективности эжектора с жидкой струей. // Труды 3-й Международной научно-технической конференции. – Челябинск. – 2017. – С. 13-17.
9. Ксенз А.Я., Камбулов С.И., Колесник В.В., Ритный С.Д. К расчету водовоздушного эжектора для серийного опрыскивателя. – Изд. Владикавказ. – 2016. – Т. 53. № 1. – с. 90-97.
10. Людеке Х.Й., Котэ Б., Паули К. Гидроудар: причины, анализ и способы предотвращения. // Водоснабжение и санитарная техника. – 2015. – № 8. – С. 62-69.
11. Рабинович Н.И. Инженерные задачи механики оплошной среды в бурении. – М.: Недра, 1989. – С. 35-39.
12. Саплин Л.А., Пташкина-Гирина О.С., Волкова О.С. Сравнительный обзор и оценка российских и зарубежных гидротаранных установок. // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 3. – С. 40-44.

13. Соколов Е. Я., Зигнер К. М. Струйные аппараты. 3-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – С. 352.
14. Третьяк А. А., Кузнецова А. В., Швец В. В. Результаты моделирования процесса течения жидкости в скважинном самоочищающемся фильтре. // Издательство Томского государственного университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019а. – Т. 330. №9. – С. 128-142.
15. Третьяк А. Я., Швец В. В., Нырклов Е. А. Выбор оптимального магнитного поля с целью регенерации скважинных самоочищающихся фильтров. // Известия Томского государственного университета. Науки о Земле. – 2019б. – №2. – С. 62-71.
16. Besaghi G. Ejectors on the cutting edge: The past, the present and the perspective. // Energy Elsevier. – 2019. – Vol. 170 (C). – pp. 908-1003.
17. Deepankar V. Sharma, Patwardhan W. Ashwin, Vivek V. Ranade. Effect of turbulent dispersion on hydrodynamic characteristics in a liquid jet ejector. // Energy, Elsevier. – 2018. – Vol. 164 (C). – pp. 10-20.
18. Diwan P., Patel A. and Sahu L. Design and Fabrication of Hydraulic Ram with Methods of Improving Efficiency. // In International Journal of Current Engineering and Scientific Research. – 2016. – Vol. 3. №4. – pp. 5-13.
19. Grygo Da. Effect of the Height of the Delivery Water on Performance of Water Ram. // Technical Sciences. – 2016. – Vol. 19 (2). – pp. 139-149.
20. Guo X., Li J., Yang K., Fu H., Wang T., Guo Y., Xia Q. and Wei Huang. Optimal Design and Performance Analysis of Hydraulic Ram Pump System. // Proceeding of Institution of Mechanical Engineering. – 2018. – Part A: J Power and Energy 0 (0). – p. 15.
21. Mendebaev T.N., Smashov N.Zh., Ismailov H.K., Izakov B.K. Development of a resource-saving, small-sized downhole hydraulic machine for well drilling. // Eastem-European journal of enterpryse technologies. – 2019а. – Vol. 6/1 (102). – pp. 70-75.
22. Mendebaev T.N., Smashov N.Zh., Kumatova M.Zh. Water jet destruction of rocks in well drilling by diamond tools with independent flushing ports. // Eurasian mining. – 2019b. – Vol. 2 (32). – pp. 41-43.
23. Vang K.L., et al. Design and Hydraulic Performance of a Novel Hydraulic ram. // II International Conference on Hydroinformatics. – New York. – 2014. – p. 108.

## Reference

1. Bashkatov D.N. Handbook of drilling wells for water. Moscow. Nedra, 1979. p. 478-482. (In Russ.)
2. Gavrishin A.I. Mine waters in groundwater quality management in eastern Donbass. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2020. Vol. 10. No. 3. pp. 127-138. DOI: 10.46698/VNC.2020.62.81.008 (In Russ.)
3. Galinker E. V. The perfect gidrotaran. International scientific journal *Alternative energy and ecology*, 2011. No. 11 (103). pp. 69-71. (In Russ.)
4. Gorbunov A. K., Petrosyan O. P., Ryabchenkov D. V. Ejection and injection of reagents in preparation technologies. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Ufa. Aeterna*, 2018. pp. 40-42. (In Russ.)
5. Gridnevsky A. V. Numerical modeling of geofiltration of the right bank of the Don River to substantiate engineering protection against flooding in Rostov-on-Don. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2019. Vol. 9. No. 1. pp. 150-163. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26795 (In Russ.)
6. Derusov V.P. Backwash when drilling exploration wells. Moscow. Nedra, 1984. pp. 101-105. (In Russ.)
7. Drozdov A. N., Drozdov N. A., Gorbyleva Ya. A., Gorelkina E. I. Influence of ejectors of working fluid salinity on the characteristics of liquid-gas ejectors. *Drilling and oil*, 2019. No. 7-8. pp. 42-45. (In Russ.)

8. Ismagilov A. R., Spiridonov E. K., Belkina O. V. On increasing the efficiency of a liquid jet ejector. In: Proceedings of the 3rd International Scientific and Technical Conference. Chelyabinsk, 2017. pp. 13-17. (In Russ.)
9. Ksenz A. Ya., Kambulov S. I., Kolesnik V. V., Ritnyi S. D. Calculation of a water-air ejector for a serial sprayer. Vladikavkaz, 2016. Vol. 53. No. 1. pp. 90-97. (In Russ.)
10. Ludeke H. Y., Kote B., Pauli K. Hydroblow: causes, analysis and methods of prevention. Water supply and sanitary engineering, 2015. No. 8. pp. 62-69. (In Russ.)
11. Rabinovich N. I. Engineering problems of fluid mechanics in drilling. Moscow. Nedra, 1989. pp. 35-39. (In Russ.)
12. Saplin L. A., Ptashkina-Girina O. S., Volkova O. S. Comparative review and assessment of Russian and foreign hydraulic ram units. Bulletin of KrasGAU, 2015. No. 3. pp. 40-44. (In Russ.)
13. Sokolov E. Ya., Zigner K. M. Inkjet devices. 3<sup>rd</sup> ed. Moscow. Energoatomizdat, 1989. 352 p. (In Russ.)
14. Tretyak A. A., Kuznetsova A. V., Shvets V. V. Results of modeling the process of fluid flow in a self-cleaning downhole filter. Tomsk State University. Engineering of georesources, 2019a. Vol. 330. No. 9. pp. 128-142. (In Russ.)
15. Tretyak A. Ya., Shvets V. V., Nyrkov E. A. Selection of the optimal magnetic field for the regeneration of downhole self-cleaning filters. Bulletin of the Tomsk State University. Earth sciences, 2019b. No. 2. pp. 62-71. (In Russ.)
16. Besaghi G. Ejectors on the cutting edge: The past, the present and the perspective. Energy Elsevier, 2019. Vol. 170 (C). pp. 908-1003.
17. Deepankar V. Sharma, Patwardhan W. Ashwin, Vivek V. Ranade. Effect of turbulent dispersion on hydrodynamic characteristics in a liquid jet ejector. Energy, Elsevier, 2018. Vol. 164 (C). pp. 10-20.
18. Diwan P., Patel A. and Sahu L. Design and Fabrication of Hydraulic Ram with Methods of Improving Efficiency. In: International Journal of Current Engineering and Scientific Research, 2016. Vol. 3. No. 4. pp. 5-13.
19. Grygo Da. Effect of the Height of the Delivery Water on Performance of Water Ram. Technical Sciences, 2016. Vol. 19 (2). pp. 139-149.
20. Guo X., Li J., Yang K., Fu H., Wang T., Guo Y., Xia Q. and Wei Huang. Optimal Design and Performance Analysis of Hydraulic Ram Pump System. In: Proceeding of Institution of Mechanical Engineering, 2018. Part A: J Power and Energy 0 (0). p. 15.
21. Mendebaev T. N., Smashov N. Zh., Ismailov H. K., Izakov B. K. Development of a resource-saving, small-sized downhole hydraulic machine for well drilling. Eastem-European journal of ofenterpryse technologies, 2019. Vol. 6/1 (102). pp. 70-75.
22. Mendebaev T. N., Smashov N. Zh., Kumatova M. Zh. Water jet destruction of rocks in well drilling by diamond tools with independent flushing ports. Eurasian mining, 2019. Vol. 2 (32). pp. 41-43.
23. Vang K. L., et al. Design and Hydraulic Performance of a Novel Hydraulic ram. II International Conference on Hydroinformatics. New York, 2014. p. 108.

УДК 556.531

DOI: [10.46698/VNC.2021.20.60.014](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.20.60.014)

Оригинальная статья

## Микроэлементный состав поверхностных вод бассейна реки Малка и геохимические особенности региона

Н. В. Реутова , Т. В. Реутова , Ф. Р. Дреева , А. М. Хутуев 

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр РАН» Центр географических исследований, Россия, 360000, КБР, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2, e-mail: reutova371@mail.ru

Статья поступила: 01.06.2021, доработана: 05.07.2021, принята к публикации: 12.07.2021

**Резюме: Актуальность работы.** Изучение химического состава поверхностных вод является весьма актуальной задачей, как с точки зрения исследования вопросов миграции элементов, так и возможного наличия токсичных микроэлементов. **Целью работы** было изучение возможного влияния геохимических аномалий, расположенных в бассейне реки Малка, на содержание ряда микроэлементов в растворимой форме в поверхностных водах этого района. **Методы работы.** Исследования микроэлементного состава поверхностных вод проводились с 2013 по 2019 гг. По руслу самой реки было расположено 6 створов. Также приводятся данные по 13 притокам и 7 родникам. В этих водных объектах нами было изучено содержание 12 микроэлементов (Ag, Al, As, Cd, Cr, Cu, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn). Пробы отбирали в период интенсивного таяния ледников. Содержание тяжелых металлов определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Содержание ионов лития определяли методом капиллярного ионофореза. **Результаты работы.** Воды реки на исследуемом участке являются достаточно чистыми. Концентрации мышьяка, алюминия, меди, молибдена и кадмия были очень низкими. Концентрации мышьяка были очень низкими в пределах 1 мкг/дм<sup>3</sup>, что соответствует кларковому числу. В водах среднего течения реки Малка и ее притоков концентрации серебра повышались до 0,1-0,2 мкг/дм<sup>3</sup>, что хорошо согласуется с данными о наличии аномалий, связанных с месторождением благородных металлов в этом районе. Четко прослеживается связь между наличием повышенных концентраций свинца и цинка в поверхностных водах и участков с наличием геохимических аномалий для этих элементов. В районе расположения Малкинского месторождения железных руд, природно легированных хромом и никелем, наблюдается повышение концентраций этих элементов в поверхностных водах. Для марганца четко прослеживается тенденция закономерного снижения концентраций при транзите вод из высокогорной зоны на равнину. Высокие концентрации лития в водах верховий бассейна реки Малка связаны с Эльбрусским вулканическим центром.

**Ключевые слова:** геохимические аномалии, поверхностные воды, река Малка, Центральный Кавказ.

**Для цитирования:** Реутова Н. В., Реутова Т. В., Дреева Ф. Р., Хутуев А. М. Микроэлементный состав поверхностных вод бассейна реки Малка и геохимические особенности региона. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (3): 172 – 184. DOI: [10.46698/VNC.2021.20.60.014](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.20.60.014).

DOI: [10.46698/VNC.2021.20.60.014](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.20.60.014)

Original paper

## Microelements in the surface waters of the Malka River basin and geochemical features of the region

N. V. Reutova , T. V. Reutova , F. R. Dreeva , A. M. Khutuev 

Kabardino-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Center for Geographical Research, 2 Balkarova str., Nalchik360000, KBR, Russian Federation, e-mail: reutova371@mail.ru

Received: 01.06.2021, revised: 05.07.2021, accepted: 12.07.2021

**Abstract: Relevance.** The study of the chemical composition of surface waters is a very urgent task both from the point of view of studying the migration of elements in the environment, and the possible presence of toxic trace elements. **The aim** of this work was to study the possible influence of geochemical anomalies located in the Malka River basin on the content of trace elements in soluble form in the surface waters of this area. **Methods.** Studies of the trace element composition of surface waters were conducted from 2013 to 2019. There are 6 sampling points located along the riverbed itself. Data on 13 tributaries and 7 springs are also provided. In these water bodies, we studied the content of 12 trace elements (Ag, Al, As, Cd, Cr, Cu, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn). The samples were taken during the period of intensive melting of glaciers. The content of heavy metals was determined by atomic absorption spectrometry. The content of lithium ions was determined by capillary ionophoresis. **Results.** The waters of the river in the study area are quite clean. The concentrations of arsenic, aluminum, copper, molybdenum, and cadmium were very low. In the waters of the middle course of the Malka River and its tributaries, silver concentrations increased to 0.1–0.2  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ , which is in good agreement with the data on the presence of anomalies associated with the deposit of noble metals in this area. There is a clear link between the presence of elevated concentrations of lead and zinc in surface waters and sites with the presence of geochemical anomalies for these elements. In the area of the Malkinsky deposit of iron ores naturally alloyed with chromium and nickel there is an increase in the concentrations of these elements in surface waters. For manganese, there is a clear trend of a natural decrease in concentrations during the transit of water from the high-altitude zone to the plain. High concentrations of lithium in the waters of the upper reaches of the Malka River basin are associated with the Elbrus volcanic center.

**Keywords:** geochemical anomalies, surface waters, Malka river, Central Caucasus.

**For citation:** Reutova N. V., Reutova T. V., Dreeva F. R., Khutuev A. M. Microelements in the surface waters of the Malka River basin and geochemical features of the region. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (3): 172 – 184. DOI: 10.46698/VNC.2021.20.60.014.

### Введение

Центральный Кавказ является зоной современного и древнего вулканизма, что накладывает свой отпечаток на природные объекты. На этой территории расположен целый ряд геохимических аномалий, которые не могли не отразиться на химическом составе компонентов окружающей среды. Природные воды являются той частью геоэкосистем, которая осуществляет взаимосвязь сопредельных сред и соподчиненных ландшафтов, определяет перераспределение вещества в окружающей среде. Поэтому изучение химического состава поверхностных вод является весьма

актуальным, как с точки зрения исследования вопросов миграции элементов, так и возможного наличия токсичных микроэлементов.

Вопросу изучения особенностей химического состава поверхностных вод в зависимости от наличия геохимических аномалий [Binda et al., 2020; Möller et al., 2016; Su et al., 2011; Wanty et al., 2009] и их влиянию на здоровье населения [Тулакина и др., 1991; Ahmed, 2020; Muhammad et al., 2011; Wang et al., 2020] в настоящее время уделяется большое внимание.

Целью данной работы было изучение возможного влияния геохимических аномалий, расположенных в бассейне реки Малка, на содержание ряда микроэлементов в растворимой форме в поверхностных водах этого района.

Есть ряд работ, посвященных изучению химического состава вод реки [Иттиев и др., 2008а; 2008б; Панов и др., 2015; Чередник и др., 2019; Жинжакова и др., 2021]. Но все эти работы посвящены в основном изучению вод реки Малка в среднем течении и до устья, где достаточно сильно выражено антропогенное влияние. Геохимические особенности бассейна реки Малка изучены достаточно подробно [Государственная геологическая карта; Парада, 2018; Матишов и др., 2019], а микроэлементный состав поверхностных вод верховий реки остается практически неизученным. В данной работе приведены результаты исследования микроэлементного состава не только самой реки Малка, но и ее притоков ледникового и неледникового происхождения и родников и проведен сравнительный анализ результатов с геохимическими особенностями изучаемого региона.

### Материалы и методы работы

Работы по изучению химического состава вод реки Малка были начаты в 2013 году. Пробы отбирали в июле, в период интенсивного таяния ледников. Отбор проб производили в соответствии с действующим ГОСТ Р 59024-2020. Поскольку мы определяли растворимую форму микроэлементов, все пробы фильтровали через мембранные фильтры с размером пор 0,45 мкм. Консервацию проб для определения тяжелых металлов осуществляли азотной кислотой (ОСЧ) из расчета 0,5% в соответствии с ГОСТ Р 57162-2016. Транспортировку и хранение проб осуществляли при температуре 2°C – 5°C. Определение концентраций тяжелых металлов (ТМ) проводили с использованием метода атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС). Содержание ионов лития определяли методом капиллярного ионофореза.

На рисунке 1 приведена карта-схема пунктов отбора проб. Номера створов на карте и в таблицах совпадают.

### Результаты работы и их обсуждение

Высокогорные реки обладают целым рядом особенностей. Это высокая скорость течения, низкие температуры, почти полное отсутствие донных отложений, крайняя бедность биоты и, как следствие, низкая способность к самоочищению. Это делает их удобным объектом для изучения миграции микроэлементов и взаимодействий вода-порода. В данной работе мы приводим результаты 7-летнего изучения микроэлементного состава поверхностных вод верховий бассейна реки Малка. По руслу самой реки расположено 6 створов. Также приводятся данные по 13 притокам, из которых четыре ледникового происхождения (№ 7-10). Кроме того, изучен состав 7 родников, в том числе: высокогорный нарзанский источник (№ 25) глубинного происхождения, расположенный рядом с поверхностным фильтратом пере-

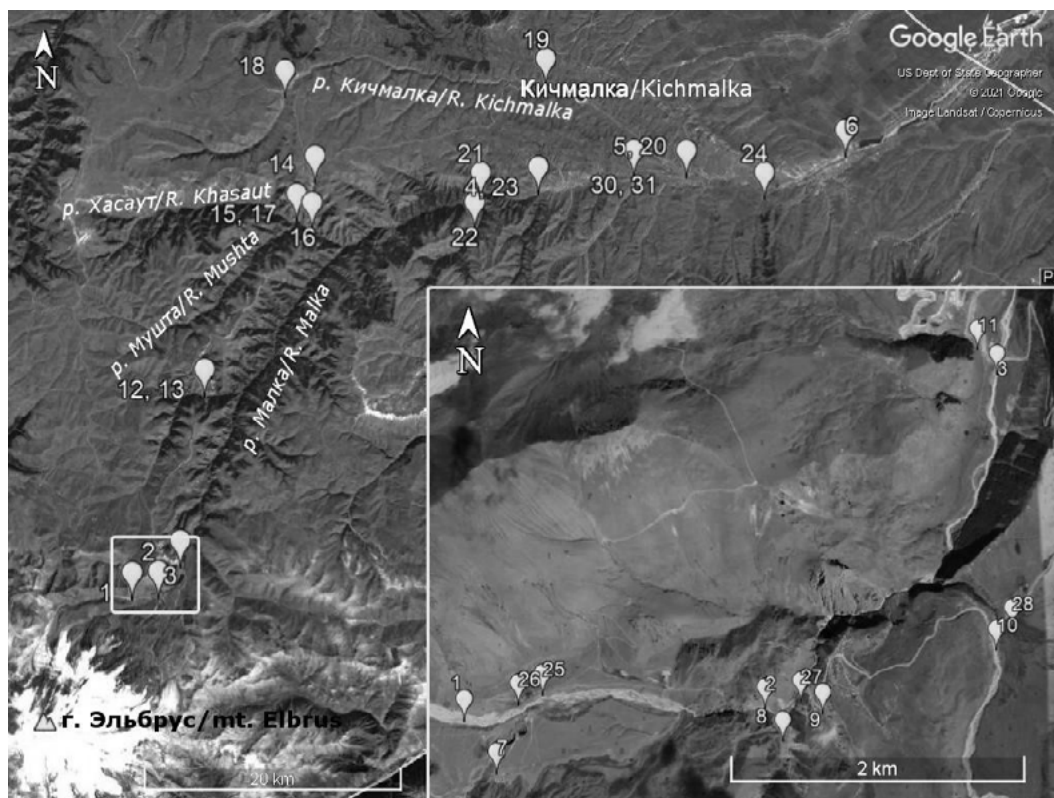


Рис. 1. Расположение пунктов отбора проб. /

Fig. 1. Location of sampling points

увлажненного луга (№26) и сероводородные источники, расположенные в пойме среднего течения реки Малка (№30, 31). Нами было изучено содержание 12 микроэлементов в этих водных объектах. Полученные данные приведены в таблице 1.

**Серебро и кадмий.** Эти элементы не приведены в таблице, поскольку их концентрации были крайне низкими. Содержание кадмия колебалось в пределах тысячных долей микрограмма на литр. Серебро встречалось в основном в сотых долях микрограмма на литр. Но, несмотря на столь низкое содержание этого элемента, в водах среднего течения реки Малка и ее притоков концентрации серебра повышались до 0,1-0,2 мкг/дм<sup>3</sup>, что хорошо согласуется с данными о наличии аномалий, связанных с месторождением благородных металлов в этом районе [Парада, 2018]. Именно здесь располагается единственное самостоятельное проявление аномалий серебра, представленное шлиховыми потоками в верховьях бассейна р. Кичмалка

**Свинец.** Оруденение свинца разных возрастов широко развито на площади работ. Наиболее крупным объектом промышленного значения в бассейне р. Малка является законсервированное Чочу-Кулакское месторождение, расположенное в правом борту р. Мушт и приуроченное к эндоконтактовой зоне малкинского гранитного массива. Минеральный состав руд: галенит, барит, сфалерит, пирит, халькопирит, кварц и кальцит [Объяснительная записка]. В районе расположения этого месторождения было изучено распределение свинца в альпийских ландшафтах бассейна среднего течения р. Малка [Матишов и др., 2019]. Авторы отмечают, что все выявленные геохимические аномалии имеют естественное происхождение и связаны с Чочу-Кулакским месторождением. Также свинцово-цинковое оруденение представлено многочисленными проявлениями и пунктами минерализации по р. р.



Малка, Хасаут, Мушт, Гитче-Лахран, большинство из которых входит в состав Малкинского рудного узла. Кроме того, довольно широко развиты шлиховые потоки галенита, связанные как с известными, так и предположительно установленными коренными источниками.

В нашем исследовании поверхностных вод этого района концентрации свинца как по самому руслу р. Малка, так и в ее притоках, оказались в основном очень низкими, ниже кларка для речных вод. Но, тем не менее, немного более повышенным содержание свинца было в воде самой реки (№ 2-3) и ее притоков (№ 6 и 8) в самых верховьях. Также повышенная концентрация свинца нами отмечена в реке Харбаз и ее притоке (№ 12 и 13), и в устье р. Гедмыш (№ 21), в бассейне которой также отмечается пункт минерализации с содержанием свинца более 1%. Несколько в меньшей степени, но все же повышенные концентрации свинца отмечены нами и в водах р. Хасаут и Мушт. Таким образом, хорошо прослеживается связь между содержанием свинца в поверхностных водах и наличием обогащенных свинцом пород.

*Цинк.* Объекты минерализации относятся к минерагенической свинец-цинковой зоне Скалистого хребта, Бечасынской полиметаллической зоне и Худесскому медноколчеданному с золотом рудному району [Геологическая карта]. Это многочисленные разновозрастные проявления и пункты минерализации медно-колчеданной и свинцово-цинковой формации, а также шлиховые потоки и ореолы сфалерита с содержанием цинка от 1-10 до 50 и более знаков [Объяснительная записка].

Концентрации цинка в поверхностных водах были заметно повышены только в районе истока реки (№ 1). Здесь же в родниках глубинного происхождения (№ 28) и фильтрате (№ 29) также отмечены относительно высокие концентрации цинка. Именно здесь расположены Кызылкольская и Восточная залежи, содержание цинка в которых достигает 5,62%. Еще одним участком с повышенным содержанием цинка в воде является река Харбаз (№ 12), но для этого района на карте не отмечены породы с повышенным содержанием цинка.

*Молибден.* Молибденовая минерализация в бассейне р. Малка представлена пунктами минерализации в Бечасынской зоне на р. р. Малка и Мушт с содержанием молибдена от следов до 1%. Кроме того, молибден, как попутный компонент, широко представлен в вольфрамовых проявлениях и в рудах полиметаллических месторождений Бечасынской зоны [Объяснительная записка]. В наших исследованиях концентрации молибдена были весьма низкими, практически на уровне кларковых значений. В отмеченных районах более высокого содержания молибдена в поверхностных водах мы не выявили.

*Медь.* Медное оруденение в Бассейне р. Малка представлено многочисленными проявлениями и пунктами минерализации. Практическое значение среди них имеют только рудная зона б. Колчеданной, Кызылкольская и Восточная залежи, которые относятся к Худесскому рудному району и располагаются в зоне формирования р. Малка (бассейне р. Кызылкол). Содержание меди здесь достигает 3-5%. Минеральный состав руд – пирит, халькопирит, сфалерит [Объяснительная записка]. Пункты минерализации, не представляющие практического интереса, известны также в бассейнах рек Каракая, Шаукол, Хасаут, Мушта и по р. Малка выше впадения р. Харбаз [Государственная геологическая карта]. Ореолы рассеяния меди наиболее широко развиты в пределах минерагенической зоны Передового хребта и увязываются с известными и потенциальными рудными полями. В наших исследо-

Таблица 1 / Table 1

Содержание микроэлементов мкг/дм<sup>3</sup> в поверхностных водах бассейна реки Малка (коэффициент вариации) /  
 The content of trace elements  $\mu\text{g} / \text{dm}^3$  in the surface waters of the Malka River basin (coefficient of variation)

№	Расстояние от истока (км) / Distance from the source (km)	Al	As	Cr	Cu	Li	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn
1	10,6 (р. Кызылкол) / 10.6 (Kyzylkol river)	39,67 (0,27)	0,52 (1,73)	0,55 (0,51)	1,49 (0,99)	13,1 (0,53)	37,83 (0,47)	0,21 (0,99)	0,47 (0,92)	0,43 (0,75)	77,15 (1,58)
2	12,4	76,49 (0,41)	1,05 (0,93)	0,98 (0,45)	2,51 (0,57)	14,1 (0,25)	19,16 (0,46)	0,37 (0,90)	0,85 (0,44)	1,29 (0,86)	18,64 (0,58)
3	15,7	74,79 (0,05)	1,30 (0,59)	0,90 (0,73)	1,27 (0,43)	20,0 (0,25)	13,91 (0,58)	0,37 (0,76)	1,05 (0,60)	1,52 (1,01)	32,62 (0,63)
4	65,6	148,32 (0,30)	1,45 (0,51)	1,25 (0,43)	3,30 (0,20)	10,5 (0,17)	14,13 (0,79)	0,63 (1,09)	2,06 (1,05)	0,71 (0,54)	13,89 (0,10)
5	79,1	110,75 (0,30)	0,93 (0,66)	1,57 (0,47)	3,78 (0,36)	11,0 (0,32)	12,76 (0,89)	0,42 (0,60)	1,20 (0,59)	0,80 (0,70)	40,43 (0,57)
6	93,9	89,27 (0,43)	1,07 (0,74)	1,20 (0,15)	4,03 (0,33)	11,3 (0,33)	8,43 (0,77)	0,46 (0,57)	2,28 (0,67)	1,00 (0,43)	26,35 (0,37)
Приитоки / Tributaries											
7	р. Уллукол (8,6) / R. Ulukol (8.6)	65,97 (0,02)	2,11 (1,02)	0,76 (0,46)	2,58 (0,86)	9,4 (0,47)	3,67 (0,49)	0,17 (0,91)	0,48 (0,94)	0,61 (0,44)	21,91 (0,34)
8	р. Бирджалы (6,3) / R. Birjaly (6.3)	42,27 (0,07)	0,61 (0,87)	0,61 (0,61)	1,58 (0,57)	10,0 (0,41)	9,23 (0,34)	0,31 (0,49)	0,55 (0,45)	1,50 (0,77)	26,46 (0,87)
9	р. Султангорасы (1,9) / R. Sultangorasu (1.9)	101,98 (0,39)	3,57 (0,24)	0,44 (0,72)	2,06 (0,96)	18,3 (0,07)	3,38 (0,78)	0,27 (0,67)	0,35 (0,77)	0,75 (0,42)	24,70 (0,72)
10	р. Каракаюсу (8,0) / R. Karakayasu (8.0)	103,09 (0,11)	1,24 (0,36)	1,20 (0,97)	2,28 (0,82)	13,5 (0,26)	22,83 (0,47)	0,33 (0,93)	1,73 (1,55)	1,05 (0,44)	17,78 (0,05)
11	р. Сирх (1,2) / R. Sirch (1.2)	51,49 (0,19)	0,69 (0,42)	1,33 (0,33)	2,07 (0,86)	2,0 (0,87)	4,91 (0,57)	0,09 (1,50)	2,38 (0,30)	0,73 (0,51)	34,71 (0,66)
12	р. Харбаз (13,8) / R. Kharbaz (13.8)	90,24 (0,42)	0,24 (1,73)	1,22 (0,43)	3,47 (0,81)	3,1 (0,48)	6,81 (0,72)	0,10 (1,45)	3,06 (1,00)	2,14 (1,40)	54,21 (1,04)
13	Ручей (1,6), прав. приток р. Харбаз / Stream (1.6), right tributary of the river. Kharbaz	70,80 (1,01)	0,63 (1,19)	0,55 (0,61)	1,63 (0,60)	1,1 (1,28)	3,57 (0,56)	0,06 (1,82)	0,80 (0,43)	1,63 (1,10)	22,19 (0,38)

14	р. Шагжагмаз (1,2) / R. Shatzhatmaz (1,2)	49,85 (0,48)	1,75 (0,40)	0,82 (0,88)	2,06 (0,63)	5,4 (0,69)	4,07 (0,89)	0,47 (0,38)	0,61 (0,31)	0,43 (0,67)	18,93 (0,20)
15	р. Хасаут (20,3) / R. Hasaut (20.3)	86,87 (0,62)	1,03 (0,32)	0,80 (0,46)	2,27 (0,93)	7,5 (0,38)	5,85 (0,44)	0,10 (1,61)	1,40 (0,49)	0,76 (0,60)	27,32 (0,45)
16	р. Хасаут (25,2) / R. Hasaut (25.2)	79,31 (1,00)	0,87 (0,21)	0,79 (0,24)	1,58 (0,95)	5,0 (0,27)	7,35 (0,48)	0,05 (2,24)	1,53 (0,62)	0,72 (0,37)	29,63 (0,74)
17	р. Мушта, устье (25,3) / R. Mushta, estuary (25.3)	33,74 (0,25)	0,31 (1,41)	1,00 (0,22)	2,97 (1,06)	2,8 (0,00)	5,78 (0,42)	<ПО	1,77 (0,07)	0,83 (0,24)	23,91 (0,88)
18	р. Кичмалка (21,9) / R. Kichmalka (21.9)	41,66 (0,75)	1,05 (0,26)	0,42 (0,68)	1,68 (0,73)	2,2 (1,73)	3,90 (0,37)	0,39 (0,97)	0,66 (0,56)	0,53 (1,33)	26,91 (0,75)
19	р. Кичмалка (45,6) / R. Kichmalka (45.6)	68,23 (0,99)	0,83 (0,72)	0,65 (0,59)	1,42 (0,43)	5,5 (1,02)	5,35 (0,87)	1,12 (0,51)	0,80 (0,48)	0,49 (0,76)	23,83 (0,41)
20	р. Кичмалка (61,6) / R. Kichmalka (61.6)	43,48 (0,74)	0,78 (0,89)	1,03 (0,34)	2,57 (0,81)	0,8 (1,41)	3,61 (0,40)	1,26 (0,23)	0,95 (0,30)	0,28 (1,28)	34,06 (0,43)
21	р. Гедмыш, устье (12,8) / R. Gedmysh, estuary (12.8)	11,07*	1,22*	2,86*	1,61*	<ПО	3,64*	0,83*	2,51*	3,59*	24,66*
22	р. Гедмыш (9,7) / R. Gedmysh, estuary (9.7)	27,74 (0,96)	0,40 (1,41)	1,64 (0,29)	2,71 (1,03)	<ПО	3,00 (0,18)	0,19 (1,41)	1,59 (0,51)	0,39 (0,09)	26,40 (0,65)
23	руч. Кызылкол (Хабазский) (6,6) / Kyzylkol stream (Khabaz) (6.6)	21,47 (0,77)	1,17 (0,53)	3,96 (0,40)	2,18 (0,23)	3,6 (0,82)	3,80 (0,29)	0,84 (0,26)	2,09 (0,59)	0,60 (0,31)	38,38 (0,24)
24	р. Экипшоко-НЛ (12,0) / R. Ekiptsoko-NL (12.0)	32,99 (0,49)	1,73 (0,56)	1,07 (0,32)	3,14 (0,63)	6,2 (0,35)	5,51 (0,44)	0,29 (0,53)	1,18 (0,95)	0,44 (0,40)	41,58 (0,03)
Родники / Springs											
25	Белый нарзан / White narzan	48,73 (0,69)	1,55 (0,32)	1,21 (0,39)	3,11 (1,03)	50,0 (0,06)	230,47 (0,03)	0,06 (1,73)	5,52 (1,01)	0,60 (0,34)	54,57 (0,65)
26	родник-фильтрат ч/з поляну Эммануэля (0,2) / spring filtrate through Emmanuel's glade (0.2)	23,97*	2,31*	0,86*	1,10*	37,9*	82,86*	0,36*	1,83*	0,50*	54,74*
27	питьевой родник Джилы-Су / Dzhyly-Su drinking spring	382,62 (0,93)	3,96 (0,35)	0,84 (0,50)	2,10 (1,03)	47,6 (0,06)	7,06 (0,48)	0,95 (0,25)	0,58 (0,35)	0,58 (0,44)	38,78 (0,17)

28	Родник Каракая (0,1) / Spring Karakaya (0.1)	48,85 (0,93)	0,67 (0,56)	0,81 (0,63)	1,49 (0,61)	66,1 (0,07)	9,89 (0,19)	0,25 (0,72)	1,55 (0,48)	0,55 (0,62)	17,82 (0,27)
29	Родник на дороге у Долины нарзанов / Spring on the road near Narzan Valley	74,72 (1,19)	1,21 (0,39)	1,17 (0,48)	5,51 (1,03)	<ПО	4,97 (0,52)	0,44 (0,76)	0,94 (0,98)	0,83 (0,48)	26,72 (0,39)
30	Кренополе Псынашхиль / Сrenopolis Psynashhibl	64,83 (0,84)	0,24 (1,41)	0,97 (0,28)	2,55 (1,06)	17,0 (0,15)	3,20 (0,03)	2,34 (0,04)	0,89 (0,41)	0,24 (1,41)	62,73 (0,17)
31	Ист. Тхабзашхопс / Тkhabzashhops spring	45,73 (0,45)	0,25 (1,41)	0,90 (0,31)	2,12 (0,55)	32,1 (0,16)	6,48 (0,18)	1,83 (0,18)	0,44 (0,08)	0,12 (1,41)	18,11 (1,41)
	ПДК <sub>питьев.</sub> / Drinking water MPC	500	50	500	1000	3	100	250	100	30	50
	ПДК <sub>рыбхоз.</sub> / MPC fisheries reservoir	40	50	70	1	80	10	1	10	6	10
	Кларки речных вод / Clark River Water	160	2	1	7	2,5	10	1	2,5	1	20

\* – пробы отбирали однократно / samples were taken once  
<ПО – ниже предела определения / below the detection limit

ваниях концентрации меди в поверхностных водах оказались очень низкими, ниже кларковых показателей. Повышения концентраций, которые могут быть объяснены наличием геохимических аномалий мы не выявили. Хотя следует отметить, что во всех пробах содержание меди превышало ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

*Никель.* В бассейне р. Малка промышленных месторождений никеля не выявлено, но он присутствует в промышленных концентрациях в некоторых эндогенных и экзогенных месторождениях. Известно 3 пункта минерализации никеля в бассейне р. Шаукол (правый приток р. Малка) в минерагенической зоне Передового хребта, представленных линзами и жилами кварц-карбонатных пород. По данным С. Г. Парада с соавторами [Парада и др. 2014] аномалии никеля и хрома в определенной степени связаны с расположением кварц-карбонатных пород. Мощность оруденелых пород не превышает 8 м, протяженность зон достигает 2 км, содержание никеля колеблется от 0,06 до 0,29%. При этом, среднее содержание никеля в природно легированных рудах Малкинского месторождения, расположенного в среднем течении р. Малка – 0,49%. Именно в этой части бассейна в поверхностных водах нами обнаружены более высокие концентрации никеля (табл. 1). В целом содержание данного элемента в основном ниже кларковых значений, поэтому говорить о заметном обогащении этих вод никелем нельзя.

*Хром.* Оруденение хрома представлено пунктом минерализации, который расположен в среднем течении р. Малка в правом борту (б. Дюрбеджи-Дорбук) и представлен жилообразными телами хромитов в серпентинитах малкинского массива. Кроме того, хром содержится в рудах Малкинского месторождения (среднее содержание хрома – 0,98%) [Объяснительная записка]. В нашем исследовании поверхностных вод несколько повышенные концентрации хрома наблюдаются начиная с 16-го и до 94-го километра течения реки и в ее притоках в этом же районе. Можно предположить, что это связано с наличием вышеупомянутых месторождений. В среднем, в данном районе превышение кларковых показателей составляет 1,2-1,5 раза, что свидетельствует об обогащении хромом этих поверхностных вод.

*Мышьяк.* Геохимические аномалии мышьяка в бассейне Малки связаны с пунктом минерализации Сирх (1,5% мышьяка), а также со шлиховыми потоками в верховьях Кичмалки. Помимо того, мышьяк является сопутствующим элементом многочисленных объектов полиметаллического и медного оруденения по всей площади бассейна водосбора [Объяснительная записка, Геологическая карта]. В поверхностных водах изучаемого района концентрации мышьяка были очень низкими и колебались в пределах одного микрограмма на литр, что соответствует кларковому числу. Только в воде питьевого родника (№27), расположенного в районе пункта минерализации Сирх, концентрация мышьяка составила почти 4 мкг/дм<sup>3</sup>.

*Алюминий.* Этот элемент давно привлекает особое внимание в связи с тем, что уже в концентрациях 0,2 мг/л в питьевой воде он может вызывать повышение частоты нейродегенеративных заболеваний [Flaten, 2001; Martyn et al., 1989]. В изучаемом районе проявления алюминия осадочного генезиса представлены линзами и пластами бокситов мощностью до 2 м., протяженностью до 1 км при ширине до 500 м, приуроченных к коре выветривания вулканитов шоанской свиты. Содержание глинозема 51-58%. В поверхностных водах бассейна р. Малка концентрации алюминия достаточно низкие, в 2-3 раза меньше кларковых значений. Только вода питьевого родника (№27) отличается высокой концентрацией алюминия.

*Марганец.* Марганец – единственный элемент, для которого четко прослежива-

ется тенденция закономерного снижения концентраций при транзите вод из высокогорной зоны на равнину (табл. 1). Это прослеживается как по руслу самой реки, так и на ее притоках. В воде притоков высокогорной зоны концентрации марганца выше, чем на равнине. Очень высокая концентрация марганца (даже превышающая в 2,3 раза ПДК для питьевой воды) характерна для источника «Белый Нарзан» (№25). Этот факт мы уже отмечали и для других нарзанных источников, расположенных в Баксанском ущелье [Реутова и др., 2017].

*Литий* – самый легкий микроэлемент с высокой биологической активностью. Его содержание в русле р. Малка на участке с 11-го по 16-й километр повышалось, а после выхода в среднегорную и затем равнинную зону сохранялось на постоянном, причем достаточно высоком уровне. Источниками поступления лития являются водотоки, сформированные на склонах Эльбруса, как ледниковые, содержащие 10-18 мкг/л Li, так и, в основном, родниковые, концентрации Li в которых 40-60 мкг/л. Притоки в среднегорной и предгорной зонах и даже высокогорная р. Сирх, водосбор которой отделен от Эльбруса долиной самой р. Малка, содержали литий в невысоких концентрациях, иногда ниже ПО (1 мкг/л). Таким образом, можно выделить Эльбрусский вулканический центр как геохимическую аномалию по литию. Еще один дополнительный источник этого элемента находится в правобережной части Малки между 66-ым и 79-ым километрами от истока реки и представляет собой выходы холодных сероводородных вод. Однако, его воздействие на полноводную на этом участке Малку не прослеживается.

### Выводы

В результате проведенных исследований было выявлено, что в целом воды реки на исследуемом участке являются достаточно чистыми, превышения ПДК для питьевой воды не выявлено (за исключением пункта отбора №25 со стабильно высокими концентрациями марганца).

1. Концентрации алюминия, меди и молибдена были очень низкими и не совпадали с наличием геохимических аномалий.

2. Четко прослеживается связь между наличием повышенных концентраций свинца и цинка в поверхностных водах и участками с наличием геохимических аномалий для этих элементов.

3. В районе расположения Малкинского месторождения железных руд природно легированных хромом и никелем наблюдается повышение концентраций этих элементов в поверхностных водах.

4. Высокие концентрации лития в водах верховий бассейна реки Малка связаны с Эльбрусским вулканическим центром.

### Литература

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Карта полезных ископаемых и закономерностей их размещения К-38-I, VII (Кисловодск).

2. Жинжакова Л.З., Чередник Е.А. Мониторинговые исследования сезонных изменений концентраций загрязняющих веществ в водах р. Малка за многолетний период наблюдений. // Экологическая химия. – 2021. – Т. 30. №1. – С. 1-6.

3. Иттиев А.Б., Мирзоева Н.М., Атабиев А.В., Биттиров М.Б., Казанчев М.Х., Курманова М.К. Оценка содержания химических загрязнителей в бассейне р. Терек и Малка. // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2008а. –№5. – С. 95-98.

4. Иттиев А. Б., Биттиров М. Б., Мирзоева Н. М., Атабиев А. В. Итоги мониторинга загрязняющих веществ в контрольных створах р. Малка. // Вестник КрасГАУ. – 2008б. – № 1. – С. 119-124.
5. Матишов Г. Г., Парада С. Г. Аномалии свинца в альпийских ландшафтах бассейна реки Малки (Кабардино-Балкарская Республика). // В сб.: Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. Коллективная монография. Посвящена 70-летию доктора физико-математических наук, профессора, Заслуженного изобретателя Российской Федерации, Почетного деятеля науки и техники Российской Федерации, Засуженного деятеля науки Республики Северная Осетия-Алания Заалишвили В. Б. / Под редакцией А. В. Николаева, В. Б. Заалишвили. – 2019. – С. 744-748.
6. Панов В. Д., Базелюк А. А., Лурье П. М. Река Терек. Гидрография и режим стока. – Ростов-на-Дону: Донской издательский дом, 2015. – 606 с.
7. Парада С. Г. Закономерности размещения цветных и благородных металлов в пределах Малкинского ультрабазитового массива (Кабардино-Балкарская Республика). // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – № 1. – С. 69-78.
8. Парада С. Г., Столяров В. В., Маркин М. Ю., Шишкалов И. Ю. Проявление потенциально платиноносных гипербазитов в геохимических аномалиях Ni, Cr и Co на примере восточной части Передового хребта (Кабардино-Балкарская Республика). // Геология и геофизика Юга России. – 2014. – № 2. – С. 42-53.
9. Реутова Н. В., Дреева Ф. Р., Реутова Т. В., Керимов А. А., Хутуев А. М. Химический состав родниковых вод высокогорной и среднегорной зоны КБР. // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2017. – № 2 (76). – С. 83-89.
10. Тулакина Н. В., Новиков Ю. В., Плитман С. И., Ярошев В. В. Алюминий в питьевой воде и здоровье населения. // Гигиена и санитария. – 1991. – № 11. – С. 12-14.
11. Чередник Е. А., Жинжакова Л. З. Динамика содержания микропримесей в водах ледниковой реки Малка (Кабардино-Балкария). // В сб.: Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и на сопредельных территориях. Материалы VIII Международной научной конференции. Под редакцией М. А. Польшиной. 2019. С. 191-194.
12. Ahmed J. Trace elements geochemistry in high-incidence areas of liver-related diseases, northwestern Ethiopia. // *Environ Geochem Health* – 2020. – No. 42. – pp. 1235-1254. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00387-3>
13. Binda G., Pozzi A., Livio F. An integrated interdisciplinary approach to evaluate potentially toxic element sources in a mountainous watershed. // *Environ. Geochem. Health.* – 2020. – No. 42. – pp. 1255-1272. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00405-4>
14. Flaten P.T. Aluminium as a risk factor in Alzheimer's disease, with emphasis on drinking water. // *Brain Research Bulletin.* – 2001. – No. 55 (2). – pp. 187-196. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(01\)00459-2](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(01)00459-2)
15. Martyn C.N., Osmond C., Edwardson J.A., Barker D.J. P., Harris E.C., Lacey R.F. Geographical relation between Alzheimer's disease and aluminium in drinking water. // *The Lancet.* – 1989. – No. 333 (8629). – pp. 61-62.
16. Möller P., Rosenthal E., Inbar N., Magri F. Hydrochemical considerations for identifying water from basaltic aquifers: The Israeli experience. // *Journal of Hydrology: Regional Studies.* – 2016. – No. 5. – pp. 33-47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.016>
17. Muhammad S., Shah M.T., Khan S. Health risk assessment of heavy metals and their source apportionment in drinking water of Kohistan region, northern Pakistan. // *Microchemical Journal.* – 2011. – No. 98 (2). – pp. 334-343. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2011.03.003>
18. Su S., Li D., Zhang Q., Xiao R., Huang F., Wu J. Temporal trend and source apportionment of water pollution in different functional zones of Qiantang River, China. // *Water Research.* – 2011. – No. 45 (4). – pp. 1781-1795. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.11.030>

19. Wang Yu, Zhu G, Engel B, Wu Yi. Probabilistic human health risk assessment of arsenic under uncertainty in drinking water sources in Jiangsu Province, China. // *Environ. Geochem. Health*. – 2020. – No. 42. – pp. 2023-2037. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00476-3>
20. Wanty R.B., Verplanck Ph.L., San Juan C.A., Church S.E., Schmidt T.S., Fey D.L., De Witt E.H., Klein T.L. Geochemistry of surface water in alpine catchments in central Colorado, USA: Resolving host-rock effects at different spatial scales. // *Applied Geochemistry*. – 2009. – Vol. 24. – pp. 600-610. doi:10.1016/j.apgeochem.2008.12.012

## References

1. State geological map of the Russian Federation. Map of minerals and patterns of their distribution K-38-I, VII (Kislovodsk) (In Russ.)
2. Zhinzhakova L.Z., Cherednik E.A. Monitoring studies of seasonal changes in the concentration of pollutants in the waters of the river Malka over a long-term observation period. *Environmental chemistry*, 2021. Vol. 30. No. 1. pp. 1-6. (In Russ.)
3. Ittiev A.B., Mirzoeva N.M., Atabiev A.V., Bittirov M.B., Kazanchev M.Kh., Kurmanova M.K. Assessment of the content of chemical pollutants in the basins of rivers Terek and Malka. *Izvestiya VUZov, North Caucasian region. Natural Sciences*, 2008a. No. 5. pp. 95-98. (In Russ.)
4. Ittiev A.B., Bittirov M.B., Mirzoeva N.M., Atabiev A.V. The results of the monitoring of pollutants in the control sections of the river Malka. *Bulletin of KrasGAU*, 2008b. No. 1. pp. 119-124. (In Russ.)
5. Matishov G.G., Parada S.G. Lead anomalies in the alpine landscapes of the Malka river basin (Kabardino-Balkarian Republic). In: *Proceedings Hazardous natural and anthropogenic processes in mountainous regions: models, systems, technologies*, 2019. pp. 744-748. (In Russ.)
6. Panov V.D., Bazelyuk A.A., Lurie P.M. Terek river. Hydrography and flow regime. Rostov-on-Don, Donskoy Publishing House, 2015. 606 p. (In Russ.)
7. Parada S.G. Regularities in the distribution of non-ferrous and noble metals within the Malkinsky ultramafic massif (Kabardino-Balkarian Republic). *Geology and Geophysics of Russian South*, 2018. No. 1. pp. 69-78. (In Russ.)
8. Parada S.G., Stolyarov V.V., Markin M. Yu., Shishkalov I. Yu. Manifestation of potentially platinum-bearing hyperbasites in the geochemical anomalies of Ni, Cr and Co on the example of the eastern part of the Peredovoy Range (Kabardino-Balkarian Republic). *Geology and Geophysics of Russian South*, 2014. No. 2. pp. 42-53. (In Russ.)
9. Reutova N.V., Dreeva F.R., Reutova T.V., Kerimov A.A., Khutuev A.M. The chemical composition of the spring waters of the high-mountain and mid-mountain zones of the KBR. *Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the RAS*, 2017. No. 2 (76). pp. 83-89. (In Russ.)
10. Tulakina N.V., Novikov Yu.V., Plitman S.I., Yaroshev V.V. Aluminum in drinking water and public health. *Hygiene and sanitation*, 1991. No. 11. pp. 12-14. (In Russ.)
11. Cherednik E.A., Zhinzhakova L.Z. Dynamics of the content of trace elements in the waters of the glacial river Malka (Kabardino-Balkaria). In: *Proceedings of the VIII International Scientific Conference "Problems of nature management and the ecological situation in European Russia and adjacent territories"*, 2019. pp. 191-194. (In Russ.)
12. Ahmed J. Trace elements geochemistry in high-incidence areas of liver-related diseases, northwestern Ethiopia. *Environ Geochem Health*, 2020. No. 42. pp. 1235-1254. DOI: 10.1007/s10653-019-00387-3
13. Binda G., Pozzi A., Livio F. An integrated interdisciplinary approach to evaluate potentially toxic element sources in a mountainous watershed. *Environ. Geochem. Health*, 2020. No. 42. pp. 1255-1272. DOI: 10.1007/s10653-019-00405-4



14. Flaten P.T. Aluminium as a risk factor in Alzheimer's disease, with emphasis on drinking water. *Brain Research Bulletin*, 2001. No. 55 (2). pp. 187-196. DOI: 10.1016/S0361-9230 (01) 00459-2
15. Martyn C.N., Osmond C., Edwardson J.A., Barker D.J. P., Harris E.C., Lacey R.F. Geographical relation between Alzheimer's disease and aluminium in drinking water. *The Lancet*, 1989. No. 333 (8629). pp. 61-62.
16. Möller P., Rosenthal E., Inbar N., Magri F. Hydrochemical considerations for identifying water from basaltic aquifers: The Israeli experience. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2016. No. 5. pp. 33-47. DOI: 10.1016/j. ejrh. 2015.11.016
17. Muhammad S., Shah M.T., Khan S. Health risk assessment of heavy metals and their source apportionment in drinking water of Kohistan region, northern Pakistan. *Microchemical Journal*, 2011. No. 98 (2). pp. 334-343. DOI: 10.1016/j. microc. 2011.03.003.
18. Su S., Li D., Zhang Q., Xiao R., Huang F., Wu J. Temporal trend and source apportionment of water pollution in different functional zones of Qiantang River, China. *Water Research*, 2011. No. 45 (4). pp. 1781-1795. DOI: 10.1016/j. watres. 2010.11.030.
19. Wang Yu, Zhu G, Engel B, Wu Yi. Probabilistic human health risk assessment of arsenic under uncertainty in drinking water sources in Jiangsu Province, China. *Environ. Geochem. Health*, 2020. No. 42. pp. 2023-2037. DOI: 10.1007/s10653-019-00476-3
20. Wanty R. B., Verplanck Ph. L., San Juan C. A., Church S. E., Schmidt T. S., Fey D. L., De Witt E. H., Klein T. L. Geochemistry of surface water in alpine catchments in central Colorado, USA: Resolving host-rock effects at different spatial scales. *Applied Geochemistry*, 2009. Vol. 24. pp. 600-610. DOI:10.1016/j. apgeochem. 2008.12.012

## МИХАИЛ ГРИГОРЬЕВИЧ БЕРГЕР (07.08.1938-27.08.2021)



27 августа 2021 года в результате сердечной недостаточности скоропостижно скончался известный советский и российский ученый, заслуженный деятель науки СО АССР, академик Российской Академии естественных наук, академик Международной академии экологии и безопасности жизнедеятельности, главный научный сотрудник отдела геологии, гидрогеологии и геоэкологии Геофизического института Владикавказского научного центра Российской академии наук, доктор геолого-минералогических наук, профессор Бергер Михаил Григорьевич.

Наше знакомство с Михаилом Григорьевичем произошло в мае 1996 года. Дело в том, что 22 апреля 1996 г. я успешно защитил докторскую диссертацию в МГУ и возвращался домой в Грузию по обыкновению через Владикавказ, где жила семья родителей супруги.

Хотя наука в России находилась тогда в тяжелейшем состоянии, но в южных республиках, в той же Грузии, было еще хуже. Зарплаты практически не было. В домах, в отличие от институтов, свет давали только на один-два часа. Иногда вообще света не было. Газа и отопления нигде не было. Работать было очень тяжело. На тот период я получил приглашения на работу в целый ряд зарубежных университетов. Но моя мать, да и супруга были против. Но зато одобряли возможную работу во Вла-

дикавказе. Тем более, что там, в Медицинском государственном институте учился мой младший сын. Все это обусловило то, что после беседы с моим бывшим однокурсником по Тбилисскому государственному университету Константином Харебовым, переехавшим в Владикавказ, и встречи с Председателем Госстроя Северной Осетии Б.М. Томаевым, я в мае 1996 года встретился с председателем Владикавказского научного центра, доктором физико-математических наук, профессором А.Г. Кусраевым. В результате беседы, где мне было предложено создание специальной структуры в виде Центра инженерной сейсмологии, по совету А.Г. Кусраева я посетил географический факультет СОГУ им. К.Л. Хетагурова для встречи с профессором М.Г. Бергером для выяснения возможности будущего сотрудничества.



Было время лекций и я ожидал в коридоре завершения занятий, проводимых профессором. Хотя мне сложно было слышать, о чем говорил негромкий голос за дверью, но зато я хорошо слышал ответный дружный смех студентов. Вот открылась дверь и я увидел симпатичного, подтянутого мужчину среднего возраста. Обратил внимание и на легкую, модную кепку в руке. В связи с очередной лекцией и моим отъездом, мы начали наш разговор там же, в коридоре.

Беседа наша с Михаилом Григорьевичем оказалась весьма интересной и неожиданно достаточно продолжительной. Представившись, я рассказал о нашем возможном сотрудничестве. Суровые глаза собеседника смотрели прямо, да и вопросы его были краткими и деловыми. Я заявил, что буду стараться развивать геофизическое направление в Республике. И в завершение я рассказал о необходимости получения российских и зарубежных грантов, и моем стремлении этим активно заниматься. Неожиданно Михаил Григорьевич весь осветился, глаза стали теплыми и лучистыми.

ми. Затем он крепко пожал мне руку и сказал, что с активно работающим ученым и порядочным человеком ему всегда по пути. Помню, потом мы тепло обнялись и расстались. Думали расстанемся ненадолго, но оказалось на целых 6 лет.

Целый ряд обстоятельств и событий привел к тому, что в ноябре 1997 года в Тбилиси я создал и возглавил общественную научную организацию «Центр прикладной геофизики, инженерной сейсмологии и сейсмической защиты сооружений». Основой центра стали коллеги из различных институтов Академии наук Грузии. Вскоре мы выиграли целый ряд зарубежных грантов. При этом все проекты, в основном, писались мною, да и были мною руководимы.

В следующий мой приезд, по предложению А.Г. Кусраева в 1998 году я по совместительству начал работать в руководимом им Институте прикладной математики и информатики РСО-Алания. В 2000 г. в ОНЗ РАН была поддержана идея создания Северо-Кавказского Отделения (на правах филиала) Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, который я и возглавил. К сожалению, постоянного рабочего места, несмотря на все наши усилия, структура эта, так и не получила. Правда, мы приобрели некоторое оборудование при поддержке проекта НАТО.

И в 2002 г. мне предложили возглавить Геофизический центр экспериментальной диагностики, организованный в 1999 году. Этого я точно не хотел, т.к. руководство филиалом ИФЗ РАН вполне удовлетворяло моим амбициям. Более того я предложил в возможные директора профессора М.Г. Бергера, с которым незадолго до этого случайно встретился на защите К.К. Хулелидзе в Северо-Кавказском горно-металлургическом институте (СКГМИ). Но меня уговорили. И отсутствие места для работы сыграло в этом согласии основную роль. Необходимо отметить, что меня весьма поразили изменения в состоянии Михаила Григорьевича. В этот раз я увидел уставшего и явно не очень здорового человека. Хотя сила духа и интеллект остались у него те же. Кстати, профессора на возможную работу с нами уговаривать в этот раз пришлось дольше.

С 2003 г. Михаил Григорьевич возглавил отдел геологии, гидрогеологии и геоэкологии, созданный по его же предложению. Вместе со мной он возглавил также исследования по причинно-следственным связям схода ледника Колка 20 сентября 2020 г. Именно с этого времени его активная научная деятельность была неразрывно связана с Геофизическим институтом Владикавказского научного центра Российской академии наук.

В 2011 г. появилась проблема публикации новых разработок и достижений. Дело в том, что требования к необходимому числу публикаций совершенно изменились. Михаил Григорьевич посетовал в беседе со мной на эту проблему, связанную с отсутствием специализированных геолого-геофизических журналов на Кавказе, я ему задумчиво вторил. Неожиданно мы посмотрели друг на друга и вдруг нас осенило. Идея создать свой, собственный журнал была бы блестящим и востребованным решением. Мы вместе придумали его название «Геология и геофизика Юга России». Несмотря на мое предложение возглавить будущую редколлегию журнала, Михаил Григорьевич сразу предупредил, что активно заниматься издательской работой не сможет. Время. Более того, предложил мне самому возглавить его. В настоящее время, наш журнал «Геология и геофизика Юга России» вошел в международную базу данных «Скопус». Это произошло не только благодаря редколлегии, сформированной известными в мире учеными из разных стран, но и оригинальным статьям самого М.Г. Бергера.



В 2006 году, после моего возвращения из Одессы, мы готовили статьи для публикации. В информационном листке были прописаны условия публикации. В частности, там, видимо, по недосмотру, кроме необходимости аннотации на английском языке было требование к авторам и об обязательном наличии аннотации на украинском языке. Прочитав это, Михаил Григорьевич заулыбался. Через час он принес готовую статью с аннотацией на украинском.

М.Г. Бергер был принципиальным ученым. Он четко делил дружбу и работу. Его статьи были всегда продуманы с точностью до запятой. Помню, как однажды, набирая его текст, наша сотрудница по невнимательности допустила ошибки. И отправила в редакцию, не проверив текст, хотя Михаил Григорьевич просил обязательно перечитать его. Традиционно доброжелательный и вежливый, он неожиданно преобразился. Помню его суровые слова о том, что никогда больше не даст набирать текст этой сотруднице.

Однажды я был на грани ухода с работы. Это было на первых порах моего директорства. Надо же, именно тогда, мы случайно пересеклись с Михаилом Григорьевичем. Заметив мое унылое настроение, он разговорил меня. Помню до сих пор почти каждое слово нашей первой душевной беседы. Он просто рассказал о своей жизни. И это позволило мне пересмотреть свое решение. Раз и навсегда. И когда мне становилось тяжело, я вспоминал эти слова.

Михаил Григорьевич очень тепло относился к молодежи. И это отношение, безо всякого сомнения, было обоюдным. Он неоднократно поддерживал их в нелегких ситуациях. Его советы были всегда бесценны. Еще он очень любил детей.

Сегодня мы прощаемся с нашим коллегой и другом – профессором Михаилом Григорьевичем Бергером. Понимаю, что никто не вечен. Но каждая такая смерть вырывает из наших рядов коллег, друзей, товарищей! Память о таких людях навсегда останется в наших сердцах!

*Главный редактор*

*В.Б. Заалишвили*

---

---

**ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ**

---

---

В журнале «Геология и геофизика Юга России» публикуются оригинальные статьи теоретического и методического характера по вопросам геологии, геофизики и геохимии, результаты изучения состава и строения коры и мантии Земли, процессов формирования и общих закономерностей размещения полезных ископаемых, а также результаты разработки и применения геолого-геофизических методов их выявления. Тематика журнала соответствует следующим областям знаний по действующей номенклатуре ВАК: 25.00.03 – Геотектоника и геодинамика; 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых; 25.00.11 – Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения; 25.00.23 – Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов; 25.00.35 – Геоинформатика; 25.00.36 – Геоэкология, а также смежным научным направлениям.

Для работ регионального характера предпочтение отдается статьям, раскрывающим различные вопросы геологического строения Юга России и прилегающих территорий.

В соответствии с градацией наук, принятой в международных системах цитирования Scopus и Web of Science статьи для публикации в журнале «Геология и геофизика Юга России» принимаются по следующим отраслям и группам наук:

1. Earth and Planetary Sciences (**науки о Земле и планетарные науки**);
2. Environmental Science (**наука об окружающей среде**).

В журнале «Геология и геофизика Юга России» печатаются:

- статьи с изложением новых научных результатов, объемом не более 10 машинописных страниц, включая иллюстрации и таблицы;
- краткие сообщения, содержащие информацию о важных результатах предварительных исследований, объемом 3-5 страниц (эти материалы впоследствии могут использоваться в тексте полной статьи);
- обзоры печатных работ по актуальным геолого-геофизическим и экологическим проблемам Юга России и прилегающих территорий, объемом 20-25 страниц по заказу редакции.

Все работы должны соответствовать тематике журнала. Предоставленные рукописи проходят этапы предварительного и итогового рецензирования, и в случае необходимости, направляются авторам на исправление и доработку. Рукописи в журнале публикуются на русском либо английском языках, аннотации на русском и английском языках. Журнал публикует исключительно оригинальные статьи. Автор несет полную ответственность за соблюдение этого требования. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не возвращаются. Редакция также не возвращает присылаемые материалы. Редакция оставляет за собой право производить сокращение и редакторскую правку текста статьи. Исправления в тексте и иллюстрациях авторы могут вносить только на стадии подготовки статьи к набору. Несоблюдение правил оформления рукописи приведет к отклонению статьи. Публикация бесплатна для авторов статей, написанных по заказу редакции, и для аспирантов. Перепечатка допускается только с разрешения редакции и с обязательной ссылкой на журнал «Геология и геофизика Юга России».

### Инструкция для авторов

Прием материалов к рассмотрению осуществляется посредством электронного сервиса <http://www.geosouth.ru> или по почте на адрес Издательства: 362002, Россия, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, редакция журнала «Геология и геофизика Юга России».

В редакцию необходимо предоставить следующие материалы:

- статья (структуру и правила оформления см. ниже);
- на отдельной странице: сведения об авторах, содержащие фамилию, имя, отчество, ученую степень, звание, название организации, служебный и домашний адрес и телефоны, e-mail и указание, с кем из авторов предпочтительнее вести переписку;
- направление от организации, если предоставляемые материалы являются результатом работы, выполненной в этой организации; в направлении следует указать название рубрики журнала;
- экспертное заключение или другой документ, разрешающий опубликование в открытой печати, утвержденные руководителем организации и заверенные гербовой печатью (представляют только авторы из России).

Если материалы подаются посредством электронного сервиса, бумажные экземпляры рукописи в редакцию предоставлять не требуется. При онлайн регистрации необходимо руководствоваться пошаговыми инструкциями по загрузке файлов. При отправке материалов почтой необходимо приложить два бумажных экземпляра статьи, подписанных всеми авторами. Подготовленный в соответствии с общими техническими требованиями текст печатается на одной стороне листа формата А4. Аннотация с приведенным в начале названием, авторами, их аффилиацией печатается на отдельном листе. Подписи к рисункам также предоставляются отдельно. Каждая таблица и рисунок должны быть напечатаны на отдельном листе. Внизу страницы с иллюстрацией необходимо указать номер рисунка. Также необходимо приложить электронный вариант на любом портативном накопителе или по согласованию с редакцией направить соответствующие материалы по электронной почте.

### Правила оформления статьи

На первой странице должны быть указаны: УДК; название статьи на русском языке (строчными буквами с капитализацией начальной буквы только первого слова в предложении и имен собственных, без кавычек, переносы не допускаются, точка в конце не ставится, подчеркивание не используется), кегль 20 полужирный, выравнивание по центру; инициалы и фамилии авторов, ученая степень и звание (кегль 14 полужирный курсив, выравнивание по центру), название учреждения, почтовый адрес, город, страна представляющих рукопись для опубликования. Указать e-mail для переписки ответственного автора.

Аннотация должна быть объемом 250-300 слов. В ней не рекомендуется использовать формулы и ссылки на литературу. Если рукопись подается на русском языке, то аннотация должна быть продублирована на английском с указанием названия статьи, фамилий и инициалов авторов на этих языках. Если рукопись подается на английском языке, необходимо привести также аннотацию на русском. Аннотация печатается шрифтом Times New Roman (12 кегль). В конце аннотации обязательно указываются ключевые слова (5-8), которые отражают тематику статьи.

Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размером 14 пт через одинарный интервал, выравнивание по формату. Подзаголовок – шрифт курсивный, выравнивание по левому краю. При написании статьи используются общепринятые термины, единицы измерения и условные обозначения, единообразные по всей статье. Расшифровка всех используемых авторами обозначений дается при первом употреблении в тексте. Буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого алфавита – прямым шрифтом. Математические символы  $\lim$ ,  $\lg$ ,  $\ln$ ,  $\arg$ ,  $\text{const}$ ,  $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\min$ ,  $\max$  и т.п. набираются прямым шрифтом. Символ не должен сливаться с надсимвольным элементом в химических элементах ( $\text{H}_2\text{O}$ ) и единицах измерений ( $\text{МВт/см}^2$ ) – прямым

(обычным) шрифтом. Не следует смешивать одинаковые по написанию буквы латинского, греческого и русского алфавитов, использовать собственные макросы. Буквы I и J, v и u, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (нуль) должны различаться по начертанию. Между цифровым значением величины и ее размерностью следует ставить знак неразрывного пробела. Переносы в словах либо не употреблять. Не использовать в тексте для форматирования знаки пробела. Формулы создаются с помощью встроенного редактора формул Microsoft Equation с нумерацией в круглых скобках – (2), выравниваются по правому краю, расшифровка всех обозначений (букв) в формулах дается в порядке упоминания в формуле. Во избежание недоразумений и ошибок редакция рекомендует авторам использовать в формулах буквы латинского, греческого и других (не русских) алфавитов; при наборе формул необходимо соблюсти размеры по умолчанию. Большие формулы необходимо разбивать на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при использовании формульного редактора каждая строка – отдельный объект). Нумерацию и по возможности знаки препинания следует ставить отдельно от формул обычным текстом. Таблицы, рисунки, фотографии размещаются внутри текста и имеют сквозную нумерацию по статье (не по разделам!) и собственные заголовки. Названия всех рисунков, фотографий и таблиц приводятся на русском языке 11 кеглем, курсивом. Нумерация обозначений на рисунках дается по порядку номеров по часовой стрелке или сверху вниз. Рисунки необходимо по возможности выполнять в векторном формате виде, желательно в программе Corel Draw или аналогах по следующим правилам: ширина рисунка не более 16,5 см; толщина линий: основных – 1 пт, вспомогательных – 0,5 пт; для обозначений в поле рисунка использовать шрифт Times New Roman размером – 9 пт. Векторные рисунки записываются в отдельные файлы документов. Фотоснимки должны быть контрастными и выполненными на матовой бумаге. Отсканированные фотографии записываются в файлы в формате TIFF, JPEG. Сканировать изображение следует с разрешением 300 dpi для контрастных черно-белых рисунков и 600 dpi – для полутонных. Цветные иллюстрации допускаются по согласованию с редакцией. Обозначения, термины, иллюстративный материал, список литературы должны соответствовать действующим ГОСТам.

Перечень литературных источников приводится общим списком в конце статьи (Harvard Style). Список составляется по алфавиту, сначала следуют источники на русском, затем – на английском. Литература должна быть оформлена согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008. Отсылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках в строку с текстом документа. Если ссылку приводят на документ, созданный одним, двумя или тремя авторами в отсылке указывают фамилию первого автора и сокращение «и др.» («et al.» для документов, на языках, применяющих латинскую графику); если авторы не указаны – указывают название документа; далее указывают год издания и при необходимости сведения дополняют указанием страниц. Сведения в отсылке разделяют запятой. Если отсылка содержит сведения о нескольких ссылках, группы сведений разделяют знаком точка с запятой. В отсылке допускается сокращать длинные заглавия, обозначая опускаемые слова многоточием с пробелом до и после этого предписанного знака.

#### Адрес редакции:

Россия, РСО-Алания, 362002, Россия, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, Геофизический институт ВНИЦ РАН, Редакция журнала «Геология и геофизика Юга России». Тел: 8 (8672) 76-19-28; факс: 8 (8672) 76-40-56, e-mail: southgeo@mail.ru



---

---

**INFORMATION FOR AUTHORS**

---

---

The journal “Geology and Geophysics of Russian South” publishes original articles of theoretical and methodological nature on geology, geophysics and geochemistry, the results of studying the composition and structure of the Earth’s crust and mantle, the formation processes and the general patterns of mineral resources, geophysical methods for their detection. The subject of the journal corresponds to the current nomenclature areas of knowledge of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation: 25.00.03 – Geotectonics and geodynamics; 25.00.10 – Geophysics, geophysical methods of mineral exploration; 25.00.11 – Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny; 25.00.23 – Physical geography and biogeography, soil geography and landscape geochemistry; 25.00.35 – Geoinformatics; 25.00.36 – Geoecology and related scientific directions..

For works of a regional nature, preference is given to articles that reveal the various issues of the geological structure of the South of Russia and adjacent territories.

According to the gradation of Sciences accepted in the international citation systems Scopus and Web of Science articles for publication in the journal “Geology and Geophysics of the South of Russia” are accepted by the following branches and groups of Sciences:

1. Earth and Planetary Sciences;
2. Environmental Science.

The journal “Geology and Geophysics of Russian South” publishes:

- articles interpreting the new scientific research results of volume not more than 10 typewritten pages including illustrations and tables;
- brief messages containing information on the important results of the preliminary research of volume 3-5 pages (these materials can be used in the full article text);
- reviews of the typewritten articles on the actual problems on current geological, geophysical and environmental problems of the South of Russia and adjacent territories, volume 20-25 pages by the editor’s order.

All papers must correspond to the journal theme. The presented manuscripts pass the preliminary and total reading stages and if necessary are sent back to the authors for the correction and finishing. The manuscripts are published in Russian and in English, the abstracts in Russian and in English as well. The journal publishes only the original articles. The author is fully responsible for the requirement. The manuscripts are not returned to the authors in case of being rejected in publication. The editor also does not return the materials sent. The editor has a right to make reductions and corrections of the article text. All corrections in the text and figures can be done by the authors only at the stage of the typesetting preparations. The infringement of the manuscript submission guidelines will lead to the article rejection. The publication is free of charge for authors of papers written by request of the publisher, and for graduate students. Reprinting is allowed only with the editorship permission with the obligatory references to the journal “Geology and Geophysics of Russian South”.

### Instructions for the authors

Acceptance of materials for consideration is carried out through the electronic service <http://www.geosouth.ru> or by mail to the Publisher address: 93a, Markova Street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal “Geology and Geophysics of Russian South”.

The following materials should be presented:

- an article (structure and rules see below),

- a separate sheet with the information about the authors: surname, name, patronymic name, scientific degree, rank, a name of the organization, office and home address and telephone number, e-mail (if exists) and the reference to the author to contact with;
- a confirmation from the organization if the presented materials are the result of the work carried out in that organization; the journal heading (section) should be pointed out in the confirmation;
- an expert conclusion or any other document allowing the publication in the open press confirmed by the organization head and proved with the stamped seal; the expert conclusion is presented only by the authors from Russia.

If materials are submitted by electronic service, paper copies of the manuscript are not required to be submitted to the editorial office. When registering online, you must follow the step-by-step instructions for uploading files. When sending materials by regular mail, you must attach two paper copies of the article, signed by all authors. Text prepared in accordance with the general technical requirements is printed on one side of an A4 sheet. An annotation with the title, authors and their affiliation given at the beginning is printed on a separate sheet. Signatures to the figures are also provided separately. Each table and figure should be printed on a separate sheet. At the bottom of the page with an illustration, you must specify the number of the picture. It is also necessary to attach an electronic version on any portable storage device or, in agreement with the editors, send the relevant materials by e-mail.

### The article lay-out rules (submission guidelines)

The following information should be pointed out on the first page: universal decimal classification, the article heading (title) in Russian (Sentence Case, without quotation marks, without division of a word, without a full stop at the end, underlining isn't used), point 20 semi bold, centre aligning; the authors surnames, academic degrees and titles (point 14 semi bold type, the right-edge aligning), the organization name, post address, town, country and e-mail of corresponding author.

The abstract should be 250-300 words without formulas and literature references. In case a manuscript is presented in Russian, the abstract should be repeated in English with the article heading (title), surnames and names in this language. In case a manuscript is presented in English, the Russian variant must be supplied. The abstracts are typed in Times New Roman (12 point) in one file in the following order: the article heading (title), the authors, the name of the organization, the abstract text in Russian with the further information in 2 lines in the same sequence in English. The abstracts are also published in the journal site [www.naukagor.ru](http://www.naukagor.ru) (in Russian and in English). Keywords (5-8) that reflect the theme of the article must be specified at the end of the abstract.

The article text is typed in Times New Roman (14 pt) through an ordinary interval aligning along the format. A subtitle is typed in italics, aligning along the left edge. The common terms, measurement units and conventional symbols similar to the whole article are used. The decoding of all symbols is given for the first text use. The Latin alphabet letters are typed in the italics while the Greek letters in the straight type. The mathematical symbols  $\lim$ ,  $\lg$ ,  $\ln$ ,  $\arg$ ,  $\text{const}$ ,  $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\min$ ,  $\max$ , etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements ( $\text{H}_2\text{O}$ ) and measurement units ( $\text{MW}/\text{cm}^2$ ) and must be of the straight (ordinary) type. One shouldn't mix similar written letters of the Latin, Greek and Russian alphabets and should use the proper macros. The letters I and J, v and  $\nu$ , e and l, h and n, q and g, V and U, O (letter) and 0 (zero) must differ in inscribing. There must be a sign of the continuous gap between a value figure meaning and its dimension. The hyphen is not used; the gap character also mustn't be used in the text for the lay-out. The formulas are designed with the help of the built-in

formulas processor (Microsoft Equation), the enumeration being done in the round brackets (2), aligned along the right edge; the decoding of all signs (letters) in the formulas is given in the order of the formula reference. To avoid the errors and misunderstandings, the editorial staff recommends the authors to use the Latin, Greek and other (not Russian) alphabet letters in the formulas and to keep to the omission sizes while the formulas printing. Large formulas must be divided into separate fragments. If possible, the fragments must be independent; each line is a separate object. The enumeration and punctuation marks should be put into an ordinary text separately from the formulas. The tables, pictures and photos are placed inside the text and must have a through numeration along the text (not by the sections!) and their own headings. The titles of all tables, pictures and photos are presented in Russian (11 point, italics). The numeration of the picture symbols is given in clockwise order or from up to down. The pictures should be done in the computer form, preferably in Corel Draw or compatible program using the following rules: a picture width – not more than 16.5 cm, a line thickness: the main – 1 pt, auxiliary – 0,5 pt; for the symbols in the picture area – «Times New Roman» type of 9 pt must be used. The vector pictures are written into the separate documentary files. The photo pictures must be contrast and performed on the mat paper. The scanned photos are written into the files of TIFF and JPEG format. To scan the image one should use the resolution of 300 dpi for the contrast black-white pictures and 600 dpi for semitone ones. The colour illustrations are admitted on the editorial agreement. All symbols, terms and illustrations should correspond to the operative standards.

The list of references is given in the general list at the end of the article. The list is compiled alphabetically (Harvard style); sources in Russian follow first, then in English. Literature in Russian should be issued in accordance with GOST R 7.0.5-2008. References to the literature in the text are given in square brackets in a line with the text of the document. If a link is given to a document created by one, two or three authors, in the reference indicate the name of the first author and the abbreviation “et al.”; if authors are not specified, the name of the document is indicated; further the year of publication is indicated and, if necessary, the information is supplemented with the indication of the pages. The information in the reference is separated by a comma. If the reference contains information about multiple links, the information groups are separated by a semicolon. It is allowed to abbreviate in a reference long titles, denoting dropped words with an ellipsis with space before and after this prescribed sign.

#### The editorial office address:

93a, Markova street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal «Geology and Geophysics of the South of Russia». Phone +7 (8672) 76-19-28; fax: +7 (8672) 76-40-56, e-mail: southgeo@mail.ru

**ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА  
ЮГА РОССИИ  
(№ 3. 2021 г. Том 11)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 24.09.2021 г. Формат 60×84 1/8.  
Дата фактического выхода 30.09.2021 г.  
Усл. печ. лист 22,5. Гарнитура «Times».  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Тираж 100 экз. Заказ № 83.  
Свободная цена.

**Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-72125 от 29 декабря 2017 г.**

Издатель:  
**Геофизический институт – филиал ФГБУН Федерального научного центра  
"Владикавказский научный центр Российской академии наук"**

Адрес издателя и редакции:  
362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а  
тел. 8 (8672) 764084; факс 8(8672) 764056  
e-mail: southgeo@mail.ru  
<http://geosouth.ru>

Отпечатано ИП Цопановой А.Ю.  
362000, г. Владикавказ, пер. Павловский, 3

