

ISSN 2221-3198

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 2 / 2022



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 12
№ 2 / 2022**

Владикавказ 2022

**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 **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

Ph. D., проф. **Г.П. Ганапати**, Центр по смягчению последствий стихийных бедствий и управлению, Технологический институт Веллур, Индия
д.т.н., проф. **В.И. Голик**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

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

д.г.н., **А.Н. Гуня**, Институт географии РАН, г. Москва

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

д.г.м.н. **В.М. Макеев**, Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва

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. **Али Пинар**, Босфорский университет, Турция

д.г.м.н., проф. **В.В. Стогний**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

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

д.г.-м.н., проф. **С.Г. Парада**

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, 2022

Фото на обложке – Святой Георгий Дигорского ущелья (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,
Russian Federation

Alexey D. Gvishiani, Academician of RAS, Geophysical
Center of RAS, Moscow, Russian Federation

Mikhail Ch. Zalikhanov, Academician of RAS, High
Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russian
Federation

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,
Russian Federation

Sevada M. Hovhannisyan, 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

Anatoly A. Soloviev, Corresponding Member of RAS,
Geophysical Center of RAS, Moscow, Russian Federation

Peter N. Shebalin, Corresponding Member
of RAS, Institute of Earthquake Prediction Theory
and Mathematical Geophysics RAS, Moscow,
Russian Federation

Igor A. Beresnev, Ph.D., Iowa State University, USA
Ganapathy Pattukandan Ganapathy, Ph.D, Prof. Centre
for Disaster Mitigation and Management Vellore Institute
of Technology, India

Vladimir I. Golik Dr. Sci. (Tech.), Prof., Geophysical
Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian
Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russian Federation

Aleksey N. Gunya, Dr. Sci. (Geogr.), Institute of
Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Kuo-Liang Wen, Ph. D., Prof., National Central
University, Taiwan

Vladimir M. Makeev, Dr. Sci. (Geol.Min.), Sergeev Insti-
tute of Environmental Geoscience (IEG), RAS, Moscow

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

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,
Russian Federation

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

Valeriy V. Stogny, Dr. Sci. (Geol.Min.), Prof., Geophysi-
cal Institute - the Affiliate of Vladikavkaz Scientific Cen-
ter, RAS, Vladikavkaz

Marina V. Rylnikova 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, Russian
Federation (Scopus Author ID - 6508237062)

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

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,
Russian Federation

Executive Secretary

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

Managing Editor

Sergey G. Parada, Dr. Sci. (Geol.Min.), Prof.

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, 2022

Cover photo – Sculpture of Saint George of the Digora Gorge (K.S. Kharebov)

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ	
Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Докучаев А.Я., Кондрашов И.А.	
Раннекиммерийские вулcano-плутонические образования из района Садонской группы полиметаллических месторождений Северной Осетии: геодинамическая типизация и минералогия.....	6
ГЕОТЕКТНИКА И ГЕОДИНАМИКА	
Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И.	
Математическое моделирование сдвиговых сейсмических колебаний массива состоящего из рекультивированного материала отложения горнорудной промышленности (хвосты).....	19
Стогний В.В., Заалишвили В.Б., Пономарева Н.Л.	
Современная геодинамика и сейсмичность Северного Кавказа: проблемы мониторинга.....	34
ГЕОФИЗИКА	
Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Евдокимов В.С.	
Об определении механического состояния тектонических разломов	53
Карапетян Дж.К., Айрапетян О.Ю., Матевосян Г.М., Карапетян Р.К.	
Исследование динамических характеристик многопролетного моста в Ереване по микросейсмическим колебаниям	67
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ	
Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Алиев И.А., Идармачев И.Ш.	
Изучение динамики ширины трещины потенциально обвального скального массива струнным датчиком на горе Гуниб (Дагестан)	78
ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ	
Босиков И.И., Ключев Р.В., Силаев И.В.	
Комплексный анализ геолого-промышленных параметров Дороговского месторождения	89
ГЕОЭКОЛОГИЯ	
Губанов Р.С.	
Эксплуатация гидротехнических сооружений и трансформация сооружений, и трансформация прибрежного фаунистического комплекса (Tetrapoda) озера Лысый Лиман.....	103
Сазонов А.Д., Закруткин В.Е., Решетняк О.С.	
Временная изменчивость поверхностного гидрохимического стока в бассейне реки Большой Егорлык в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений	117
ПАМЯТЬ	
БОГУШ ИЛЬЯ АЛЕКСАНДРОВИЧ.....	131

CONTENTS

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

- Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Dokuchaev A.Y., Kondrashov I.A.**
Early Cimmerian volcano-plutonic formations of the Sadon group of polymetallic deposits in North Ossetia: geodynamic typification and minerageny.....6

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

- Muzaev I.D., Harebov K.S., Muzaev N.I.**
Mathematical modeling of shear seismic vibrations of an array consisting of recultivated material deposits of the mining industry (tailings)19
- Stogny V.V., Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Ponomareva N.L.**
Modern geodynamics and seismicity of the North Caucasus: problems of monitoring.....34

GEOPHYSICS

- Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Evdokimov V.S.**
Determination of the mechanical state of tectonic faults53
- Karapetyan J.K., Hayrapetyan H.Yu., Matevosyan G.M., Karapetyan R.K.**
Investigation of the dynamic characteristics of the road bridge in Yerevan by recording microseisms67

GEOPHYSICAL METHODS

- Idarmachev Sh.G., Cherkashin V.I., Aliyev I.A., Idarmachev I.Sh.**
Studying the dynamics of the crack width of a potentially collapsing rock massif with a string sensor on Mount Gunib (Dagestan)78

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY

- Bosikov I.I., Klyuev R.V., Silaev I.V.I.**
Comprehensive analysis and assessment of Prospective gold-ore zones using modern geophysical methods.....89

GEOECOLOGY

- Gubanov R.S.**
Operation of Hydraulic Structures and Transformation of Structures, and transformation of the Coastal Faunal Complex (Tetrapoda) of Lake Bald Estuary.....103
- Sazonov A.D., Zakrutkin V.E., Reshetnyak O.S.**
Time variability of surface hydrochemical runoff in the Bolshoi Yegoryk River basin under anthropogenic influence and climate change117

MEMORY

- BOGUSH ILYA ALEKSANDROVICH**131

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 552.323.5

DOI: [10.46698/VNC.2022.77.30.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.77.30.001)

Оригинальная статья

Раннекиммерийские вулканоплутонические образования из района Садонской группы полиметаллических месторождений Северной Осетии: геодинамическая типизация и минерагения

В.М. Газеев^{1, 2}, А.Г. Гурбанов^{1, 2}, А.Я. Докучаев¹, И.А. Кондрашов¹

¹Федеральное 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;

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный научный центр «Владикавказский научный центр РАН», Россия, 363110, РСО-Алания, Пригородный район, с. Михайловское, ул. Вильямса, 1, e-mail: gazeev@igem.ru

Статья поступила: 14.04.2022, доработана: 20.05.2022, одобрена в печать: 24.05.2022

Резюме: Актуальность работы. В южной части Скифской плиты, в Дигоро-Осетинской зоне Большого Кавказа, известны раннекиммерийские вулканоплутонические образования, с которыми пространственно ассоциируют полиметаллические месторождения Садонского рудного поля. Геохимические исследования этих пород необходимы для уточнения геодинамического развития региона и оценки их рудоносности. **Целью исследования** является расшифровка геодинамической позиции вулканических и плутонических пород и их минерагенической специализации. **Объектом исследований** выбраны гранитоиды Цейского комплекса, распространенные в юго-восточной части Адайхохского выступа, и эффузивные породы Садонской свиты, развитые в Штулу-Харезской депрессии и в восточной части Балкаро-Дигорского выступа Большого Кавказа. **Методы исследования** включали: петрографическое описание пород, анализы методами RFA, ICP-MS; геохимические характеристики; построение и анализ дискриминационных и диагностических диаграмм; сравнение концентраций рудных элементов в исследованных и эталонных породах близкого петрохимического типа сформировавшихся в различных геодинамических обстановках. **Результаты работы.** Установлено, что раннекиммерийские магматические породы являются нормально щелочными и реже умеренно щелочными образованиями известково-щелочной серии. Эффузивы – андезиты, дациты и риодациты – умеренно титанистые, высоко и умеренно магнезиальные образования с калиево-натровым и натровым типами щелочности. Гранитоиды – магнезиальные, высокоглиноземистые образования, близкие к гранитам андезитового ряда, но отличающиеся от последних меньшими содержаниями Sr и Ba. В них преобладают признаки гранитов I-типа с отклонениями в сторону гранитов M- и S-типов. Мультиэлементные спектры вулканитов и гранитоидов однотипны. Спектры андезитов, нормированных к *N-MORB*, свидетельствуют об обогащении их *LILE* и *HFSE*. Отмечаются обеднение пород *TREE* и негативные аномалии *Nb*, *Ti*, *Y*. Исходные расплавы образовались за счет дегидратационного плавления нижнекоровых пород фундамента Скифской плиты, происходившего при участии мантийных расплавов с *E-MORB* подобными характеристиками. Установлено, что раннекиммерийские вулканоплутонические образования формировались на активной континентальной окраине в постколлизийной обстановке, на начальном этапе задугового спрединга. Породы характеризуются высокой флюидонасыщенностью и повышенным содержанием серебра. Предполагается перспективность южной окраины Скифской плиты на открытие новых полиметаллических, Au-Ag-полиметаллических и Au-Ag месторождений, еще не вскрытых современной эрозией.

Ключевые слова: петрография, геохимия, геодинамическая типизация, минерогения, Садонская группа полиметаллических месторождений.

Благодарности: Работа подготовлена в рамках Госзадания ИГЕМ РАН РАН «Петрология и минерогения магматизма конвергентных и внутриплитных обстановок: история формирования крупных континентальных блоков», регистрационный № ЕГИСУ НИОКТР 121041500222-4 и при поддержке гос. темы регистрационный № АААА-А19-119040190054-8 в КНИО ВНЦ РАН.

Для цитирования: Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Докучаев А.Я., Кондрашов И.А. Раннециммерийские вулcano-плутонические образования из района Садонской группы полиметаллических месторождений Северной Осетии: геодинамическая типизация и минерогения. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12(2): 6-18. DOI: 10.46698/VNC.2022.77.30.001

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

[DOI: 10.46698/VNC.2022.77.30.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.77.30.001)

Original paper

Early Cimmerian volcano-plutonic formations of the Sadon group of polymetallic deposits in North Ossetia: geodynamic typification and minerageny

V.M. Gazeev^{1, 2}, A.G. Gurbanov^{1, 2}, A.Ya. Dokuchaev¹,
I.A. Kondrashov¹

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

²Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 1 Williams str., Prigorodny district, Mikhailovskoye village 363110, Russian Federation, e-mail: gazeev@igem.ru

Received: 14.04.2022, revised: 20.05.2022, accepted: 24.05.2022

Abstract: Relevance. In the southern part of the Scythian plate, in the Digoro-Ossetian zone of the Greater Caucasus, early Cimmerian volcanic-plutonic formations are known, with which the polymetallic deposits of the Sadon ore field are spatially associated. Geochemical studies of these rocks are necessary to clarify the geodynamic development of the region and assess their ore potential. **The aim of the study** is to decipher the geodynamic position of volcanic and plutonic rocks and their mineragenic specialization. Granitoids of the Tsey complex, which are distributed in the southeastern part of the Adaikhokh salient, and effusive rocks of the Sadon suite in the Shtulu-Khars depression and in the eastern part of the Balkaro-Digorsk salient of the Greater Caucasus, were chosen as the object of study. **Methods.** Petrographic description of rocks, analysis of samples by XRF, ICP-MS; calculations of geochemical characteristics; construction and analysis of diagnostic, discrimination and multi-element diagrams; comparison of the concentrations of rare and ore elements in the studied and reference rocks of similar petrochemical composition, but formed in different geodynamic settings. **Results.** It has been established that early Cimmerian igneous rocks are normally alkaline and less often moderately alkaline formations of the calc-alkaline series. Effusives – andesites, dacites and rhyodacites – are moderately titanium, high and moderately magnesian formations with potassium-sodium and sodium types of alkalinity. Granitoids are magnesian, high-alumina formations similar to andesitic granites, but differing from the latter in lower contents of Sr and Ba. They are dominated by signs of I-type granites with deviations towards M and S-type granites. The multielement spectra of volcanics and granitoids are of the same type. The spectra of andesites normalized to N-MORB indicate their enrichment in LILE and HFSE. Depletion of TREE rocks and negative anomalies of Nb, Ti, Y are noted. The initial melts were formed due to dehydration melting of the lower crustal rocks of the basement of the Scythian plate, which occurred with the participation of mantle melts with E-MORB similar characteristics. It

has been established that the Early Cimmerian volcano-plutonic formations were formed on the active continental margin in a post-collision setting, at the initial stage of back-arc spreading. The rocks are characterized by high fluid saturation and elevated silver content. The prospects of the southern margin of the Scythian plate for the discovery of new polymetallic ones are assumed, Au–Ag–polymetallic and Au–Ag deposits not yet exposed by modern erosion.

Keywords: petrography, geochemistry, geodynamic typification, minerageny, Sadon group of polymetallic deposits.

Acknowledgments: This work was supported by the State Assignment of IGEM RAS “Petrology and minerageny of magmatism in convergent and intraplate environments: history of formation of large continental blocks” Registration No. EGISU R&D 121041500222-4 and prepared with the support of the state. subject registration number AAAA-A19-119040190054-8 in the KNIO VSC RAS.

For citation: Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Dokuchaev A.Y., Kondrashov I.A. Early Cimmerian volcano-plutonic formations of the Sadon group of polymetallic deposits in North Ossetia: geodynamic typification and minerageny. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12(2): 6-18. DOI: 10.46698/VNC.2022.77.30.001

Введение

Актуальность работы. Геохимическое изучение гранитоидных плутонических пород Северной Осетии, сформировавшихся в позднем триасе – ранней юре на заключительном этапе индосинийской фазы тектогенеза, и широко распространенных здесь раннеюрских (геттанг-раннеплинсбахских) вулканоплутонических образований является важной проблемой. Ее актуальность очевидна в связи с тем, что с ними пространственно ассоциируют месторождения и многочисленные рудопроявления Садонского свинцово-цинково-медного рудного района и Штулу-Харезской (Pb-Zn-Cu) рудной зоны.

Целью исследования является петролого-геохимическое изучение раннекеммерийских (конец триаса – начало юры) вулканических и интрузивных пород, распространенных в Дигоро-Осетинской зоне Большого Кавказа (БК), их геодинамическая типизация и минерогения.

Объектами для исследования выбраны эффузивные породы Садонской свиты (СС) и гранитоиды Цейского комплекса (ЦК). Выходы СС приурочены к южному борту Штулу-Харезской депрессии и к области восточного погружения Балкаро-Дигорского выступа (рис. 1). Стратотип СС описан в долине р. Садонки. В ее основании залегают кварцевые конгломераты и гравелиты (22 м) с прослоями туфов и лав среднего состава. Верхнюю часть разреза составляют дацитовые и андезидацитовые лавы (314 м) с прослоями туфов; их суммарная мощность 336 м. Процент пирокластического материала в общем объеме продуктов извержения не превышает 22%. Возраст пород СС определен как геттанг-раннеплинсбахский (на основании находок фауны: *Aequipecten priscus* Schl., *Lima acuticosta* Goldf., *Leda graphiea* Tate., *Chlamys ex gr. textoria* Schloth) и как ааленский по определениям изотопного возраста эффузивов (К-Аг метод): 186 ± 12 млн лет. Цейский диорит-гранодиоритовый комплекс распространен в юго-восточной части Адайхохского выступа. В составе комплекса выделяют две фазы. Первая, основная, представлена гранитами, гранодиоритами и кварцевыми диоритами. Во второй, дайково-жильной фазе, по структурным особенностям выделяют гранодиорит-порфиры, андезидациты, аплиты. Имеются данные изотопного датирования: (U-Pb метод) $196 \pm 3,5$ млн лет, (К-Аг метод) дайки гранодиорит-порфиров 180 ± 8 и 181 ± 6 млн лет [Письменный и др., 2006].

Фактический материал и методы его исследования

Для проведенных исследований в 2010–2012 гг. была отобрана коллекция образцов с объектов СС и ЦК из долин рек Цейдон, Айгамуга, Архондон и из района месторождений Джимидон и Бозанг. Аналитические данные получены в ЦКП

«ИГЕМ-Аналитика». На спектрометре «Респект-100» рентгено-флуоресцентным методом (XRF) изучено 38 проб. На масс-спектрометре X-Series II методом спектроскопии с индукционно-связанной плазмой (ICP-MS) исследовано 14 проб. Аналитические измерения контролировались российскими и международными стандартами. Силикатные анализы были заимствованы из литературных источников [Цветков, 1977].

Результаты работы и их обсуждение

Андезиты и дациты СС имеют сериально-порфировую структуру. Вкрапленники представлены плагиоклазом, амфиболом и реже кварцем. Плагиоклаз (андезин, олигоклаз=андезин) присутствует в виде кристаллов, среди которых отмечены: ситовидные с включениями стекла, замещенного хлоритом, а также деанортизированные, альбитизированные и серицитизированные разновидности. Единичные кристаллы амфибола диагностируются по кристаллографическим очертаниям: они замещены агрегатом сфена, карбоната, хлорита, редко пренита. Основная масса (ОМ) имеет аллотриоморфнозернистую и микролитовую структуру. ОМ сложена полевым шпатом (преобладает), а также кварцем, сфеном, рутилом, рудным минералом и новообразованиями карбоната, хлорита, серицита, эпидота, халцедона. Дацинты отличаются появлением среди вкрапленников более кислого плагиоклаза (олигоклаза), биотита и большего количества кварца в ОМ породы.

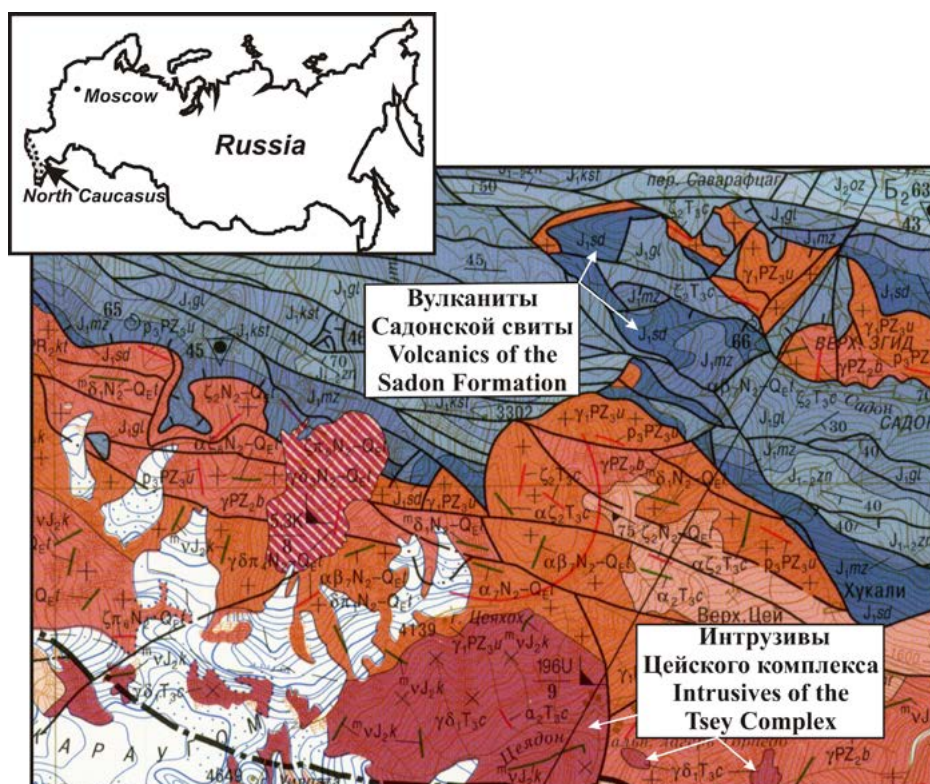


Рис. 1. Геологическая карта Ардон-Урухского междуречья, на которой показаны отложения Садонской свиты и интрузивы Цейского комплекса (использованы материалы листов К-38-VIII, XIV ФГУП «Кавказгеолсъемка», 2002 г.; Письменный и др. Государственная геологическая карта РФ. К-38 IX, XV. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2006. Карта и условные обозначения к ней на сайте <https://wega.vsegei.ru/site/gisatlas/>) /

Fig. 1. Geological map of the Ardon-Uruk interfluve with deposits of the Sadon suite and intrusions of the Tsey complex (based on the materials of the FGUP "Kavkazgeols'emka" sheets K-38-VIII, XIV. 2002; Pismenny and others. State geological map of the Russian Federation. K-38 IX, XV. – St. Petersburg: VSEGEI, 2006. Map and symbols for it on the website <https://wega.vsegei.ru/site/gisatlas/>)

Граниты, гранит-порфиры, гранодиориты характеризуются структурой от гипидиоморфнозернистой до сериально- и гломеропорфировой. Породы в разных количествах сложены плагиоклазом (олигоклазом-андезином), калиевым полевым шпатом, кварцем, роговой обманкой и биотитом. Акцессорными минералами являются апатит, циркон, сфен, магнетит, а вторичными – эпидот, карбонат, хлорит, серицит. В кварце и плагиоклазе отмечаются расплавные включения, содержащие микровключения светлой слюды, а также первичные и вторичные газово-жидкие включения. Из классификационной диаграммы $(Na_2O+K_2O) - SiO_2$, представленной на (рис. 2), следует, что фигуративные точки (ФТ) составов тяготеют к полю нормально щелочных, реже к полю умеренно щелочных пород. На AFM диаграмме они группируются вдоль трендов дифференциации пород известково-щелочной серии, а на диаграммах SiO_2 – *петрогенные элементы* установлена отрицательная корреляция TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , P_2O_5 с содержанием SiO_2 . Содержания MgO , CaO , Na_2O , K_2O существенно варьируют при одних и тех же значениях SiO_2 (рис. 2). Это умеренно-титанистые, высоко и умеренно-магнезиальные ($Mg^\#$ 0,4–0,7), умеренно- и низко-калиевые породы с калиево-натровым и натровым (Na_2O/K_2O 1,7–11,9 (Σ/n 3,6)) типом щелочности (табл. 1). ФТ на дискриминационной диаграмме (ДД) $Th/Yb - Ta/Yb$ [Gorton, Schandl, 2000] приурочены к полю пород АСМ активных континентальных окраин (АКО). На ДД $Rb/30 - Hf - Ta \times 3$ [Harris et al., 1986] ФТ группируются преимущественно в поле постколлизийных гранитов (*post-COLG*) (рис. 3). На ДД $(Na_2O+K_2O) - Fe_2O_3^T \times 5 - (CaO+MgO) \times 5$ [Гребенщиков, 2014; Наумов и др., 2010], где римскими цифрами обозначены поля кислых магматических пород основных геодинамических обстановок, ФТ преимущественно сконцентрированы в поле V – т.е. поле пород, связанных с задуговыми структурами растяжения. На ДД $Yb - Eu$ [Туркина, 2000] ФТ гранодиоритов расположены в треугольных областях модельных составов, образующихся в результате дегидратационного плавления исходных пород при давлениях около 8 кбар. Гранитоиды ЦК – это магнезиальные, высокоглиноземистые образования, близкие к гранитам андезитового ряда (K 1,8%; Zr 115 г/т; Rb 92 г/т; Nb 12 г/т; Li 14 г/т; Ta 0,7 г/т; K/Rb 267; Ba/Rb 3,3) [Туркина, 2000], но отличаются меньшими содержаниями Sr и Ba . На ДД $FeOt/(FeOt+MgO) - SiO_2$ [Frost et al., 2001] ФТ пород ЦК расположены в поле гранитов *I-type* и *S-type*. Сопоставление петрохимических показателей ЦК показывает, что они имеют характеристики преимущественно гранитов *I-type* (A/CNK 0,96; Sr 207 г/т; Rb/Sr 0,65). Некоторые их признаки (Na_2O 4,3%; K_2O 2,4%; Zr 115 г/т; Rb 85 г/т) «сдвинуты» в сторону гранитов *M-type* и, в меньшей мере, гранитов *S-type* (CaO 2,6%; Nb 12 г/т). Спектры редких земель (рис. 4), нормированные к хондриту [Sun, McDonough, 1989], свидетельствуют о фракционировании *REE* с обогащением *LREE*. La^n/Yb^n отношение в андезитах и дацитах 6,0–11,4, в гранитоидах 6,0–11,5. Отношение La^n/Sm^n , соответственно, 2,7–3,8 и 3,4–5,9. Отношение Gd^n/Yb^n , соответственно, 1,3–1,7; 1,2–1,3. ΣREE (г/т), соответственно, 60–110 и 43–99. Спектр *REE* гранитоидов ЦК сопоставим со спектрами гранитов *I-type*. Спектр *REE* андезитов СС сопоставим со спектром базальтов *E-MORB*, но отличается более высокими содержаниями *LREE*. Количественный дефицит европия Eu/Eu^* ($Eu^*=(Sm_n+Gd_n)/2$) достигает: в андезитах и дацитах 0,57–0,95; в гранитоидах – 0,67–0,75. Мультиэлементные спектры пород СС и ЦК однотипны. Спектры андезитов, нормированных к *N-MORB*, свидетельствуют об их обогащении *LILE* и *HFSE*. Отмечаются обеднение пород *TREE* и негативные аномалии *Nb*, *Ti*, *Y*.

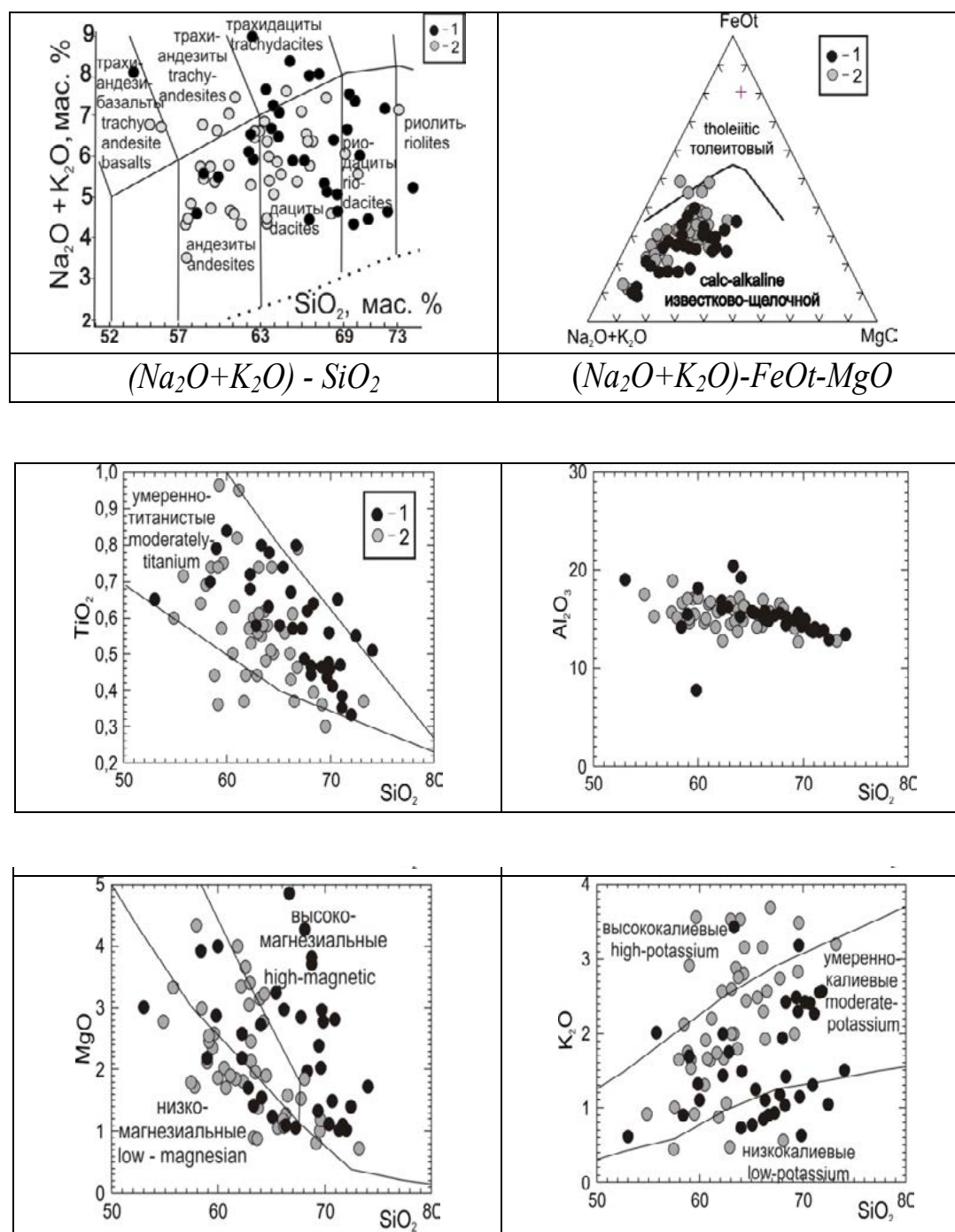


Рис. 2. Классификационные диаграммы и диаграммы концентраций петрогенных компонентов, на которых приведены составы изученных пород (в мас. %).

Условные обозначения:

- 1 – РФА вулканитов и гранитов (по результатам ЦКП «ИГЕМ-Аналитика»),
2 – силикатные анализы (по данным [Цветков, 1977]) /

Fig. 2. Rock compositions on classification diagrams and diagrams of concentrations of petrogenic components (in wt %). Symbols: 1 – XRF of volcanics and granites performed at the IGEM-Analytika Center for Collective Use, 2 – silicate analyzes [Tsvetkov, 1977]

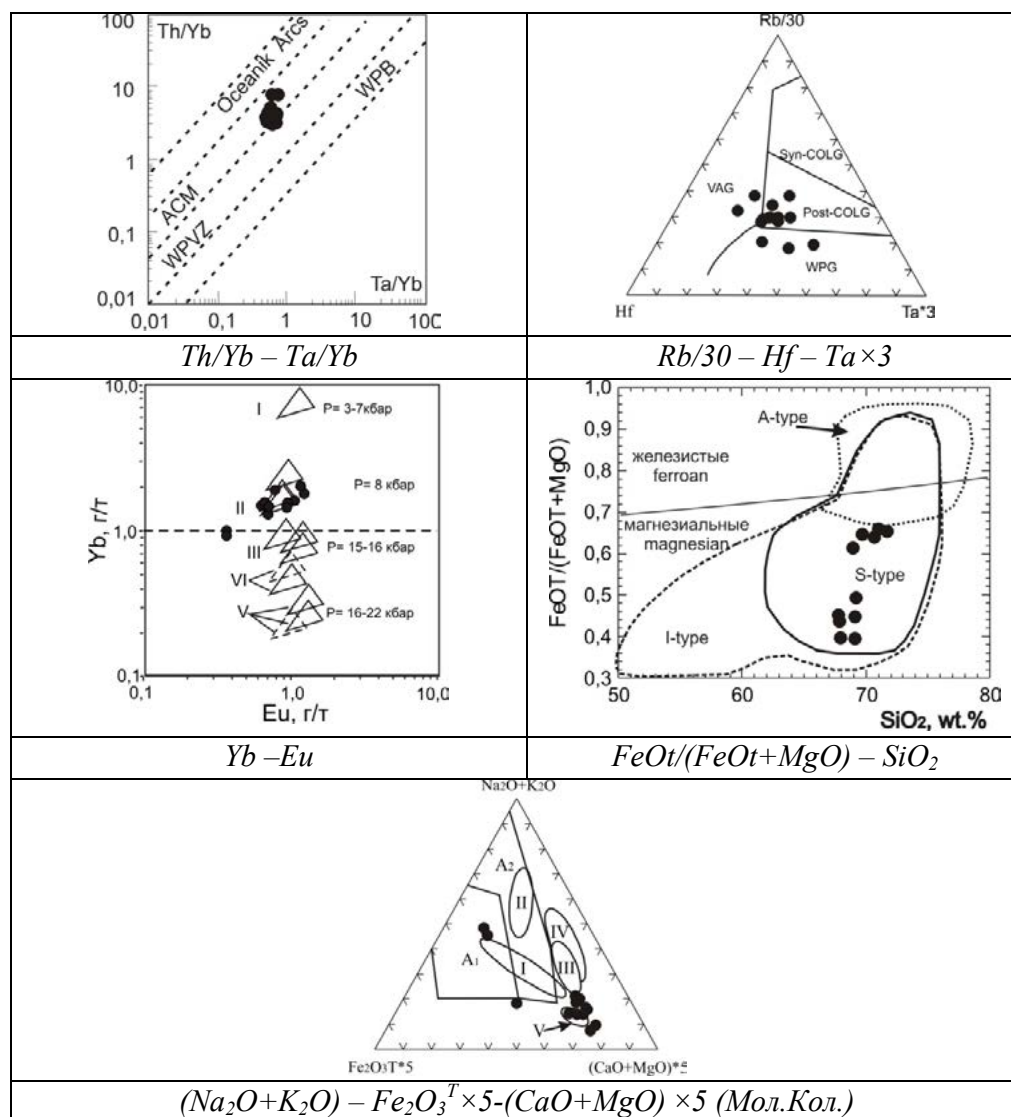


Рис. 3. На диаграмме $Th/Yb - Ta/Yb$ показаны обстановки развития: океанических дуг (Oceanic arcs), активных континентальных окраин (ACM), внутриплитных вулканических зон (WPVZ), внутриплитных базальтов (WPB).

На диаграмме $Rb/30 - Hf - Ta \times 3$ показаны обстановки развития: гранитов вулканических дуг (VAG), гранитов синколлизионных (syn-COLG), гранитов постколлизионных (post-COLG), гранитов внутриплитных (WPG).

На диаграмме $Yb - (Yb - Eu)$: P – давление в кбар.

На диаграмме $(Na_2O+K_2O) - Fe_2O_3^T \times 5 - (CaO+MgO) \times 5$ показаны обстановки проявления: I – мантийных плюмов в условиях океанических плит; II – внутриконтинентальных рифтов; III – зон островодужного магматизма; IV – зон магматизма активных континентальных окраин; V – задугового спрединга /

Fig. 3. Rock compositions on discrimination and petrogenetic diagrams. On $Th/Yb - Ta/Yb$: Oceanic arcs – oceanic arcs; ACM – active continental margins; WPVZ – intraplate volcanic zones; WPB – intraplate basalts. On $Rb/30 - Hf - Ta \times 3$: VAG granites of volcanic arcs; syn-COLG – syncollisional granites; post-COLG – post-collision granites; WPG – intraplate granites. On $Yb - (Yb - Eu)$: P – pressure in kbar. On $(Na_2O+K_2O) - Fe_2O_3^T \times 5 - (CaO+MgO) \times 5$: I – mantle plume manifestation environments under oceanic plate conditions; II – environments of intracontinental rifts; III – zones of island-arc magmatism; IV – zones of magmatism of active continental margins; V – back-arc spreading environments

Таблица 1 / Table 1

**Результаты РФА и ICP-MS анализов пород (оксиды в вес. %, элементы в г/т)
/ Results of XRF and ICP-MS analyzes of rocks (oxides in wt.%, elements in g/t)**

Номер образца / Sample number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂	62,79	71,65	71,86	70,72	64,09	53,01	59,96	69,52	69,73	62,26	62,26	58,35
TiO ₂	0,58	0,35	0,34	0,65	0,78	0,65	0,84	0,45	0,44	0,68	0,72	0,70
Al ₂ O ₃	16,23	13,78	13,86	13,86	19,20	19,00	18,22	14,9	14,97	16,06	16,89	14,23
Fe ₂ O ₃	3,91	2,70	2,56	3,34	3,52	4,72	4,97	2,49	2,91	4,43	5,97	5,32
MnO	0,07	0,06	0,05	0,14	0,06	0,09	0,07	0,05	0,06	0,09	0,07	0,09
MgO	1,71	1,04	1,05	1,49	1,54	3,02	4,00	2,38	2,95	2,58	2,18	3,92
CaO	3,63	2,43	2,28	3,14	3,30	5,35	5,99	0,27	0,32	3,54	1,76	6,25
Na ₂ O	4,27	4,26	4,45	3,82	5,58	7,41	4,44	5,07	4,75	4,61	4,41	3,68
K ₂ O	1,75	2,55	2,57	2,41	1,49	0,62	1,10	2,29	1,15	1,44	2,00	0,90
P ₂ O ₅	0,19	0,11	0,10	0,22	0,26	0,16	0,21	0,09	0,10	0,16	0,16	0,24
ппп	4,60	0,92	0,73	-	-	5,79	-	2,29	2,49	3,92	3,19	6,11
Сумма / Sum	99,73	99,85	99,85	99,79	99,82	99,82	99,8	99,8	99,87	99,77	99,61	99,79
Cr	41	27	26	50	41	58	94	62	62	36	40	37
V	73	37	35	87	103	72	102	60	75	85	85	69
Co	12	4,5	5,3	6	8	17	12	7	3,7	13	14	8
Ni	27	14	13	21	22	41	36	10	9	12	12	14
Cu	27	6	5,7	4,7	7,0	11	25	4,0	2,6	5,0	7,6	14
Zn	53	48	34	34	35	55	72	46	62	41	49	55
Pb	15	18	11	7,8	5,1	2,5	30	4,2	5,4	15	6,9	22
Rb	85	90	85	71	67	29	41	93	65	67	91	35
Sr	249	185	180	240	455	564	384	80	70	280	281	315
Ba	212	334	443	756	260	205	341	376	117	296	484	273
Nb	16	12	12	11	14	12	13	12	4	9	12	8
Zr	150	132	116	145	200	189	171	139	145	169	187	151
Y	20	17	16	16	26	27	25	14	17	19	21	18
Li	14	15	10	5,2	5,1	56	72	12	17	9,6	11	23
Be	1,6	1,5	1,6	3,1	2,1	1,1	1,4	1,4	1,7	1,5	1,8	1,2
Sc	-	3,8	4,2	20	8,9	19	27	10,2	14,7	16	17	17
Ti	3320	1944	1904	3815	4567	3614	4191	2357	2249	3513	3664	3737
Mo	0,59	0,52	0,68	0,45	2,2	0,14	0,18	2,7	0,76	1,0	1,3	0,45
Ag	0,40	-	-	0,53	2,5	0,91	0,79	1,4	0,68	0,61	0,62	0,66
Cd	0,14	0,03	0,02	0,21	0,18	0,40	0,43	0,20	0,33	0,15	0,27	0,21
Cs	2,7	1,8	1,3	0,67	0,86	0,6	1,8	1,0	1,2	2,1	3,2	1,0
La	24	21	23	15	19	18	20	8,4	8,4	11	12	18
Ce	42	39	45	33	42	41	42	18	18	22	26	41
Pr	5,9	4,1	4,5	3,8	4,9	4,8	4,7	2,0	1,8	2,9	3,3	4,7
Nd	23	14,3	15,1	15	20	20	19	8	7,2	12	14	19
Sm	4,0	2,5	2,5	3,1	4,0	4,2	3,7	1,6	1,6	2,5	2,7	3,4
Eu	1,0	0,61	0,64	0,91	1,1	0,76	1,1	0,35	0,38	0,70	0,72	0,93
Gd	3,1	2,2	2,3	2,6	3,7	3,8	3,3	1,5	1,4	2,3	2,4	2,9
Tb	0,50	0,32	0,33	0,47	0,68	0,67	0,62	0,27	0,26	0,40	0,43	0,51
Dy	2,8	2,0	2,1	2,7	3,8	3,9	3,7	1,6	1,6	2,6	2,5	2,8
Ho	0,58	0,41	0,43	0,57	0,75	0,81	0,75	0,35	0,36	0,50	0,55	0,57
Er	1,4	1,24	1,3	1,4	1,8	2,1	1,9	0,9	0,9	1,3	1,4	1,3
Tm	0,23	0,19	0,19	0,23	0,31	0,30	0,29	0,14	0,14	0,21	0,22	0,22
Yb	1,5	1,37	1,43	1,4	1,8	2,0	2,0	1,0	0,9	1,3	1,4	1,4
Lu	0,24	0,20	0,21	0,23	0,27	0,32	0,33	0,15	0,15	0,21	0,21	0,23
Hf	2,0	2,9	2,8	2,2	2,1	4,4	3,9	3,1	3,1	2,6	3,0	2,9
Ta	0,87	1	0,82	0,92	1,4	1,1	1,0	0,64	0,46	0,89	0,92	0,76
W	0,86	1,23	1,54	2,9	3,0	1,6	1,2	2,9	2,4	1,8	1,8	1,1
Bi	0,12	0,02	0,02	0,35	0,65	0,05	0,17	0,33	0,12	0,50	0,25	0,31
Th	7,7	10,2	11,1	5,6	6,9	9,1	7,2	2,9	2,9	3,9	4,5	4,4
U	1,8	2,2	2,9	1,7	2,1	2,7	2,0	1,1	1,1	1,2	1,5	1,5

Номер образца: 1, 7, 10, 11, 12 – андезиты; 4 – риодацит; 5 – дацит; 6 – трахиан-дезизбазальт; 2, 3, 8, 9 – граниты. / Sample number: Notice: 1, 7, 10, 11, 12 – andesites; 4 – rhyodacite; 5 – dacite; 6 – trachyandesitebasalt; 2, 3, 8, 9 – granites.

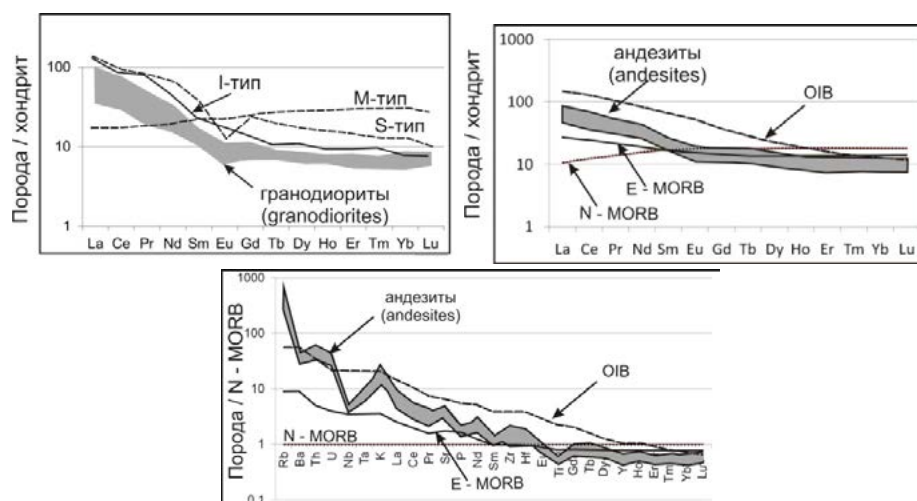


Рис. 4. Спайдер диаграммы, на которых показаны составы изученных пород: концентрации REE нормированы к хондриту; концентрации несовместимых элементов нормированы по N-MORB (по [San, McDonough, 1989]) /

Fig. 4. Compositions of rocks on spider diagrams. Concentrations of incompatible elements normalized to N-MORB, REE concentrations normalized to chondrite according to [San, McDonough, 1989].

Сравнение кларковых концентраций ($K_k > 1$) элементов для андезитов СС $Pb_{1,9}$ $Cd_{1,8}$ $Bi_{1,5}$ $W_{1,4}$ $Zr_{1,3}$ $Li_{1,1}$ $Be_{1,1}$ $Cs_{1,1}$ ($Zn_{0,8}$ $Mo_{0,7}$) и для гранитоидов ЦК $Cr_{1,8}$ ($Zn_{0,8}$ $Zr_{0,8}$ $Pb_{0,5}$) с эталонами пород разных геодинамических обстановок (по [Гусев и др., 1999]) свидетельствует, что они вполне сопоставимы с породами краевых вулканоплутонических поясов АКО и зрелых островных дуг.

Обсуждение результатов. В позднем триасе-геттанге субдукция в области Понтиды – Родопы – Странжа усилилась. Севернее зоны субдукции это привело к орогеническим деформациям в задуговой области и сжатию региона по андийскому типу. В результате орогенических событий Сванетский бассейн БК полностью закрылся, а континентальные блоки Восточных Понтид и Закавказья аккрецировались к южному окончанию Скифской платформы (СП). После завершения поздне триасовой аккреции континентальных террейнов, южнее них возникла новая зона субдукции. В синемюр – ааленское время (J_1) скорость развития субдукции уменьшилась. Это привело к проявлению главной фазы задугового растяжения. В результате, в задуговой обстановке (в области Скифско-Кавказско-Понтидского региона) возникла система рифтовых бассейнов растяжения, включая трог БК [Tikhomirov et al., 2004; Никишин и др., 2005; Grebennikov, 2014; Chalot-Plat et al., 2007]. Изученные раннекимерийские вулканические и интрузивные породы приурочены к южному окончанию СП. Они представлены нормально щелочными и, реже, умеренно щелочными породами. Эффузивы СС – это умеренно титанистые, высоко и умеренно магнезиальные ($Mg^\# 0,4–0,7$) образования. Изучение мультиэлементных и REE спектров показало, что они близки к базальтам E-MORB типа, но отличаются от последних повышенным содержанием LILE и LREE. Гранитоиды ЦК – это постколлизийные образования, возникшие в результате дегидратационного плавления исходных пород при давлениях около 8 кбар, что соответствует глубине 24–28 км. Они имеют преимущественно признаки гранитов I-type с некоторыми «отклонениями» в сторону гранитов M- и S-type. Известно, что формирование гранитов I-type может быть результатом плавления коровых магматических

пород (от основного до среднего-кислого составов) или дифференциации более мафических расплавов (что характерно для субдукционных обстановок). Степень обеднения $TREE$, Y и La^n/Yb^n определяется наличием граната и/или роговой обманки в рестите, что зависит от давлением. Смена без-гранатовых и гранат-содержащих реститов для мафических субстратов происходит при $P \geq 10$ кбар, для диорит-тоналитовых – при P 8–10 кбар. Содержание K_2O , Th и Rb определяется степенью плавления и составом источника [Туркина, 2014; Watkins et al., 2007]. Можно отметить, что изученные породы несут в себе «смешанные» петро–геохимические характеристики, что указывает на гетерогенную природу магмогенерирующих источников, одним из которых, возможно, были нижнекоровые диорит-тоналитовые образования фундамента СП, другим источником – мантийные резервуары с E -MORB подобными характеристиками вещества. Интересной особенностью пород ЦК является их высокая флюидонасыщенность. На это указывает присутствие в породообразующих минералах первичных газовой–жидких включений [Цветков, 1977]. Отметим, что часто подобными признаками обладают рудоносные интрузии [Рейф, 1990]. С раннекиммерийскими вулканическими и интрузивными породами пространственно ассоциируют месторождения (Садон, Згид, Холст, Архонское, Джимидон, Фаснал и др.) и многочисленные рудопроявления. Полиметаллические месторождения Северной Осетии, имеющие свои индивидуальные особенности, располагаются вблизи крупных региональных разломов, а к разрывам второго и третьего порядков приурочены дайки, штоки, рудные зоны и жилы. Рудные тела залегают в палеозойских гранитах и киммерийских кварцевых порфирах (с последними большинством исследователей принята генетическая связь). Глубина формирования рудных тел 2–2,5 км. Температура образования руд, по результатам декрипитации и гомогенизации газовой–жидких включений в минералах, варьирует в пределах от 340°C до 190°C [Родзянко и др., 1971]. На основании проведенного на масс-спектрометре Сектор 54 (Великобритания) в Лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН (сн.с. к.г.-м.н. Голубевым В.Н.) изотопного анализа состава свинца в галенитах ($^{206}Pb/^{204}Pb$; $^{207}Pb/^{204}Pb$; $^{208}Pb/^{204}Pb$; $^{208}Pb/^{206}Pb$; $^{207}Pb/^{206}Pb$), были рассчитаны модельные возраста свинца галенитов из следующих месторождений и рудопроявлений: Джимидон 250, 292, 391 млн лет; Архон 391 млн лет; Вехний Згид 269 млн лет; Инжинта 241, 262 млн лет; Арсином 308 млн лет [Гурбанов и др., 2017]. Полученные модельные возраста позволяют условно выделить следующие пять возрастных (в млн лет) групп: 391, 287–308, 257–269, 241–250 и 197. Важно отметить, что по величине μ_2 ($^{204}Pb/^{238}U$) на Джимидонском месторождении намечается два разных источника, модельные возраста которых соответствуют пермо-триасу и позднему карбону. Необходимо учитывать, что модельный Pb–Pb возраст обычно имеет грубый оценочный характер. При анализе полученных данных установлена однородность изотопного состава свинца на различных участках Джимидонского месторождения, что присуще рудам крупных месторождений, в формировании которых участвовал свинец главным образом из одного источника. В целом же, в галенитах из рудопроявлений Арсином, Инжинта, Кариухох, Урсдон и др. была установлена неоднородность изотопного состава свинца, что свидетельствует о его различных источниках. и щлиховые ореолы Au [Газеев и др., 2021]. Оруденение связанное с вулканиками. Также отметим, что с юрскими вулканиками СП, в Черек-Чегемском вулканическом районе (ВР) ассоциирует полиметаллическое с Au–Ag месторождение Радужное и ряд мелких рудопроявлений. В Карачаевском ВР известны рудопроявления в районе перевала Гумбаши с Au–Ag-кварц-сульфидным оруденением. В Гойско-Ачишгинской складчатой зоне

на Западном Кавказе известны жилы и зоны дробления с полиметаллами залегающими в осадочных разрезах расположено вблизи контактов субвулканических тел и зон их метасоматических (пропилитизация, аргиллизация) изменений, Это оруденение трудно объяснить особенностями кристаллизации незначительных по объему субвулканических тел и, по-видимому, оно образовалось на постмагматической стадии в период остывания субвулканических тел в результате их взаимодействия с захороненными седиментационными (вадозными) водами, с выщелачиванием рудных компонентов из терригенной черносланцевой толщи. Эти данные подтверждают представления о мобилизации Pb, Zn и благородных металлов из более древних источников [Черницын, 1977; Богуш и др., 2020]. Широкое развитие ранне-среднеюрских вулканоплутонических образований на южной окраине СП, близость их петро-геохимических показателей и невысокий уровень эрозии (до 1.5-1.7 км, а глубина формирования рудных тел 2-2,5 км) позволяют говорить о перспективности региона на открытие новых месторождений – как в палеозойском фундаменте (с жильным кварц-полиметаллическим оруденением), так и в осадочном чехле (с Au-Ag-полиметаллическим и Au-Ag-кварц-сульфидным оруденением).

Выводы

Изучены петро-химические и геохимические особенности раннекиммерийских вулканоплутонических образований Садонского Pb-Zn-Cu рудного района и Штулу-Харезской рудной зоны Северной Осетии. Показано, что эти образования формировались на активной континентальной окраине СП в постколлизийной обстановке на начальном этапе задугового спрединга. Предполагается, что исходные расплавы этих пород были образованы за счет плавления нижнекоровых, палеозойских диорит-тоналитовых образований фундамента СП, происходившего при участии мантийных расплавов с *E-MORB*-подобными характеристиками. Отмечено, что гранитоиды характеризуются высокой флюидонасыщенностью, а все породы (эффузивы и гранитоиды) по геохимическим критериям, близки к раннеюрским и ааленским магматитам, распространенным на южной окраине СП.

Высказано предположение о перспективности региона на обнаружение в нем новых полиметаллических, золото-серебро-полиметаллических и золото-серебряных месторождений, еще не вскрытых современной эрозией.

Литература

1. 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. – Т. 10. №1. – С. 81–95. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59067
2. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А. Среднеюрские вулканы Гойтхско-Ачишхинской складчатой зоны Северо-Западного Кавказа: геохимия, геодинамическая типизация и минерализация. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №3. – С. 17–32. DOI: 10.46698/VNC.2021.42.84.002
3. Гурбанов А.Г., Газеев В.М., Лексин А.Б., Докучаев А.Я., Гольцман Ю.В., Олейникова Т.И., Гурбанова О.А. Палеогеодинамические реконструкции и минерализация раннеюрского базальт-гипербазитового фиагдонского комплекса (Республика Северная Осетия-Алания, Кавказ, РФ) по петрохимическим, геохимическим и изотопным данным. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – №4. – С. 22–38.
4. Гусев Г.С., Кудрявцев Ю.К., Гущин А.В., Суринов Т.Н., Бескин С.М., Донец А.И., Ермолаев А.Н., Жабин А.Г., Куриленко Н.М., Онтеева Т.Д., Ширай Е.П. Геохимическая и ме-

таллогеническая специализация структурно–вещественных комплексов. – СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. – 514 с.

5. Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А. Гирнис А.В., Ярмолюк В.В. Средний состав магматических расплавов главных геодинамических обстановок по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стекол пород. // Геохимия. – 2010. – Т. 48(12). – С. 1266–1288.

6. 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.

7. Письменный А.Н., Горбачев С.А., Вертий С.Н., Зарубина М.А., Пичужков А.Н., Письменная Н.С., Терещенко В.В., Терещенко Л.А. Государственная геологическая карта РФ. К-38 IX, XV. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2006. – 277 с.

8. Рейф Ф.Г. Рудообразующий потенциал гранитов и условия его реализации. – М.: Наука, 1990. – 166 с.

9. Родзянко Н.Г., Джумайло В.И., Савин С.В., Сафаров Ю.А., Петросьянц О.С. Жамгоцев О.С., Баранов Г.И. Геология и геохимия Центральной части Северного Кавказа (эндогенные месторождения). – Ростов-на-Дону: Изд. Ростовского ун-та, 1971. – 189 с.

10. Туркина О.М. Модельные геохимические типы тоналит-грондьемитовых расплавов и их природные эквиваленты. // Геохимия. – 2000. – №7. – С. 704–717.

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

12. Цветков А.А. Мезозойский магматизм центральной части Северного Кавказа. – М.: Наука, 1977. – 166 с.

13. Черницын В.Б. Металлогения Большого Кавказа. – М.: Недра, 1977. – 191 с.

14. Chalot-Prat F., Tikhomirov P., Saintot A. Late Devonian and Triassic basalts from southern continental margin of the East European Platform, tracers of a single heterogeneous lithospheric mantle source. // Journal of Earth System Science. – 2007. – Vol. 116. Issue 6. – pp.469–495

15. Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. A geochemical classification for granitic rocks. // J. Petrol. – 2001. – Vol. 42. – pp. 2033–2048.

16. Gorton M.P., Schandl E.S. From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. // The Canadian Mineralogist. – 2000. – Vol. 38. – pp. 1065–1073.

17. Grebennikov A.V. A-type granites and related rocks: petrogenesis and classification. // Russian Geology and Geophysics. – 2014. – Vol. 55. No.9. – pp. 1074–1086. DOI: 10.1016/j.rgg.2014.08.003.

18. Harris N.B.W., Pearce J.A., Tindle A.G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. // Coward M.P., Ries A.C. (Eds). Collisions. Geol. Soc. Spec. Pub. – 1986. – Vol. 19. – pp. 67–81.

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

20. Tikhomirov P.L., Chalot-Prat F., Nazarevich B.P. Triassic volcanism in the Eastern Fore-Caucasus: evolution and geodynamic interpretation. // Tectonophysics. – 2004. – No.381. – pp. 119–142.

21. Watkins J. M., Clemens J.D., Treloar P.J. Archaean TTGs as sources of younger granitic magmas: melting of sodic metatonalites at 0.6–1.2 GPa. // Contrib. Mineral. Petrol. – 2007. – Vol. 154. – pp. 91–110.

References

1. Bogush I.A., Ryabov G.V., Cherkashin V.I. Genesis and ore-bearing structures of the Chukhur noble metals deposits of the North Caucasus. Geology and Geophysics of the South of Russia. 2020. Vol. 10. No. 1. pp. 81–95. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59067

2. Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Kondrashov I.A. Middle-Jurassic volcanites of the Goitkhs-ko-Achishkinsk folded zone of North-Western Caucasus: geochemistry, geodynamical typifica-

tion and minerageny. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2021. Vol. 11. No.3. pp. 17–32. DOI: 10.46698/VNC.2021.42.84.002

3. Gurbanov A.G., Gazeev V.M., Leksin A.B., Dokuchaev A.Ya., Goltsman Yu.V., Oleinikova T.I., Gurbanova O.A. Paleogeodynamic reconstructions and minerageny of the Early Jurassic basalt-hyperbasite Fiagdon complex (Republic of North Ossetia-Alania, Caucasus, RF) based on petrochemical, geochemical and isotopic data. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2017. No. 4. pp. 22–38.

4. Gusev G.S., Kudryavtsev Yu.K., Gushchin A.V., Surin T.N., Beskin S.M., et al. Geochemical and metallogenic specialization of structural-material complexes. Saint Petersburg, VSEGEI, 1999. 514 p. (In Russ.)

5. Naumov V.B., Kovalenko V.I., Dorofeeva V.A. Giris A.V., Yarmolyuk V.V. The average composition of magmatic melts of the main geodynamic settings according to the study of melt inclusions in minerals and quench glasses of rocks. *Geochemistry*. 2010. Vol. 48. Issue 12. pp. 1266–1288. (In Russ.)

6. 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.)

7. Pismenny A.N., Gorbachev S.A., Vertiy S.N., Zarubina M.A., Pichuzhkov A.N., et al. State geological map of the Russian Federation. K-38 IX, XV. Saint Petersburg, VSEGEI, 2006. 277 p. (In Russ.)

8. Reif F.G. Ore-forming potential of granites and conditions for its implementation. Moscow. Nauka, 1990. 166 p. (In Russ.)

9. Rodzianko N.G., Dzhumaylo V.I., Savin S.V., Safarov Yu.A., Petrosyants O.S. et al. *Geology and geochemistry of the Central part of the North Caucasus (endogenous deposits)*. Rostov-on-Don, Rostov University. 1971. 189 p. (In Russ.)

10. Turkina O.M. Model geochemical types of tonalite-trondhjemite melts and their natural equivalents. *Geochemistry*. 2000. No. 7. pp. 704–717. (In Russ.)

11. Turkina O.M. Lectures on the geochemistry of magmatic and metamorphic processes. Novosibirsk, NSU Research Center, 2014. 118 p. (In Russ.)

12. Tsvetkov A.A. Mesozoic magmatism in the central part of the North Caucasus. Moscow. Nauka, 1977. 166 p. (In Russ.)

13. Chernitsyn V.B. Metallogeny of the Greater Caucasus. Moscow, Nedra. 1977. 191 p. (In Russ.)

14. Chalot-Prat F., Tikhomirov P., Saintot A. Late Devonian and Triassic basalts from southern continental margin of the East European Platform, tracers of a single heterogeneous lithospheric mantle source. *Journal of Earth System Science*, 2007. Vol. 116. Issue 6. pp. 469–495.

15. Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. A geochemical classification for granitic rocks. *J. Petrol.* 2001. Vol. 42. pp. 2033–2048.

16. Gorton M.P., Schandl E.S. From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. *The Canadian Mineralogist*. 2000. Vol. 38. pp. 1065–1073.

17. Grebennikov A.V. A-type granites and related rocks: petrogenesis and classification. *Russian Geology and Geophysics*. 2014. Vol. 55. No. 9. pp. 1074–1086. DOI: 10.1016/j.rgg.2014.08.003.

18. Harris N.B.W., Pearce J.A., Tindle A.G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. Coward M.P., Ries A.C. (Eds). *Collisions. Geol. Soc. Spec. Pub.* 1986. Vol. 19. pp. 67–81.

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

20. Tikhomirov P.L., Chalot-Prat F., Nazarevich B.P. Triassic volcanism in the Eastern Fore-Caucasus: evolution and geodynamic interpretation. *Tectonophysics*. 2004. No. 381. pp. 119–142.

21. Watkins J. M., Clemens J.D., Treloar P.J. Archaean TTGs as sources of younger granitic magmas: melting of sodic metatonalites at 0.6–1.2 GPa. *Contrib. Mineral. Petrol.* 2007. Vol. 154. pp. 91–110.

УДК 551.1

[DOI: 10.46698/VNC.2022.34.57.002](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.34.57.002)

Оригинальная статья

Математическое моделирование сдвиговых сейсмических колебаний массива состоящего из рекультивированного материала отложения горнорудной промышленности (хвосты)

И.Д. Музаев^{id}, К.С. Харебов^{id}, Н.И. Музаев^{id}

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

Статья поступила: 28.03.2022, доработана: 20.04.2022, принята к публикации: 28.05.2022

Резюме: Актуальность работы. В статье поставлены и решены две начально-краевые задачи математической физики, моделирующие сдвиговые сейсмические колебания массива, состоящего из отходного материала хвостохранилища, когда движение массива вызвано падением сейсмической волны на его подстилающую поверхность. **Цель работы.** Пристальный интерес к подобным прикладным задачам обусловлен тем, что нередко такой массив расположен в узкой пойме реки близко к речному потоку. При сейсмотектонических ситуациях может создаться потенциальная экологическая опасность для речной системы региона из-за возможного обрушения в речной поток токсического материала, слагающего массив. **Методы работы.** Одна задача решена в рамках гипотезы Е.С. Сорокина относительно диссипации энергии, обусловленной внутренним сопротивлением в среде. Другая задача поставлена и решена в рамках гипотезы Кельвина-Фойгта. Один коэффициент в дифференциальных уравнениях сдвиговых колебаний является комплексной величиной. Другой коэффициент представляет функцию, зависящую от пространственной координаты. Эти особенности в представленных краевых задачах создают математические трудности при попытке их решения аналитическими методами математической физики. В связи с указанными особенностями, при произвольной зависимости коэффициентов от пространственной координаты поставленные задачи во всем мире никем не решены. **Результаты работы.** В данной работе найден путь решения этих задач в частном случае при экспоненциальной зависимости ширины массива от координаты. В этом частном случае переменные коэффициенты вырождаются в постоянные величины и тем самым путь решения поставленных задач существенно облегчается. В результате решения поставленных двух задач, для каждой получена совокупность расчетных формул для вычисления сейсмонапряжений и сейсмоперемещений в теле массива. По полученным расчетным формулам выполнены вычислительные эксперименты с использованием компьютерных технологий по определению сейсмических напряжений и перемещений на подстилающей поверхности и на гребне массива в зависимости от частоты и амплитуды падающей сейсмической волны. Полученные результаты позволяют выполнить дальнейшие оценочные расчеты по нарушению целостности массива и его частичного либо полного обрушения в речной поток.

Ключевые слова: сдвиговые колебания массива, гипотеза Сорокина, гипотеза Кельвина-Фойгта, коэффициент сопротивления, угол откоса массива.

Для цитирования: Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И. Математическое моделирование сдвиговых сейсмических колебаний массива состоящего из рекультивированного материала отложения горнорудной промышленности (хвосты). *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12(2): 19-33. DOI: 10.46698/VNC.2022.34.57.002.

DOI: [10.46698/VNC.2022.34.57.002](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.34.57.002)

Original paper

Mathematical modeling of shear seismic vibrations of an array consisting of recultivated material deposits of the mining industry (tailings)

I.D. Muzaev^{ID}, K.S. Harebov^{ID}, N.I. Muzaev^{ID}

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

Received: 28.03.2022, revised: 20.04.2022, accepted: 28.05.2022

Abstract: Relevance. When the tailings, where toxic waste from the processing of the mining and metallurgical industry was constantly dumped and accumulated, collapse, an environmental threat occurs. Sometime, the waste array is located in a narrow floodplain of the river close to the river stream. In seismotectonic situations, a potential environmental hazard may be created for the region river system due to the possible collapse of toxic material composing the massif into the river stream. **Aim.** Formulation and solution of two initial boundary value problems of mathematical physics modeling shear seismic vibrations of an array consisting of waste material of a tailings dump, when the movement of the array is caused by the fall of a seismic wave on its underlying surface. **Methods.** One problem is solved within the framework of the hypothesis of E.S. Sorokin regarding the dissipation of energy due to internal resistance in the medium. Another problem is posed and solved within the framework of the Kelvin-Voigt hypothesis. One coefficient in the differential equations of shear oscillations is a complex quantity. The other coefficient represents a function depending on the spatial coordinate. These features in the presented boundary value problems create mathematical difficulties when trying to solve them by analytical methods of mathematical physics. Due to these features, with an arbitrary dependence of the coefficients on the spatial coordinate, the tasks set have not been solved by anyone all over the world. In this paper, we have found a way to solve these problems in the special case with an exponential dependence of the array width on the coordinate. In this particular case, the variable coefficients degenerate into constant values and thus the way to solve the tasks is significantly facilitated. **Results.** When solving the two tasks, a set of calculation formulas for calculating seismic stresses and seismic displacements in the body of the array was obtained for each. According to the obtained calculation formulas, computational experiments were performed, using computer technologies to determine seismic stresses and displacements on the underlying surface and on the ridge of the array, depending on the frequency and amplitude of the incident seismic wave. The results obtained make it possible to perform further estimated calculations on the violation of the integrity of the massif and its partial or complete collapse into the river stream.

Keywords: shear vibrations of the array, resistance coefficient, slope angle of the array, hypothesis of Sorokin, hypothesis of Kelvin-Voigt.

For citation: Muzaev I.D., Harebov K.S., Muzaev N.I. Mathematical modeling of shear seismic vibrations of an array consisting of recultivated material deposits of the mining industry (tailings). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii* = *Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12(2): 19-33. DOI: 10.46698/VNC.2022.34.57.002.

Введение

Одним из негативных источников техногенного воздействия на экосистему окружающей среды являются хранилища хвостов. В них постоянно сбрасывались и накапливались токсические отходы переработки горно-металлургической промышленности. В течение нескольких десятков лет они достигли значительных размеров, как по площади, так и по мощности (толщине). Объекты нередко расположены на

сейсмоактивных территориях в узких ущельях горных рек вблизи речного потока. Тем самым создается экологическая угроза речной системе с точки зрения обрушения накопленного материала в речной поток.

На рисунке 1 представлен схематический чертеж такого хранилища, расположенного на берегу реки Ардон в республике Северная Осетия-Алания [Гурбанов и др., 2012; Матвеев, 2004]. После недавних рекультивационных работ в хранилище, накопленный материал застлан сверху балластовым материалом в виде массива, имеющего призматическую форму с трапециевидальным поперечным сечением, нависающим над потоком реки.

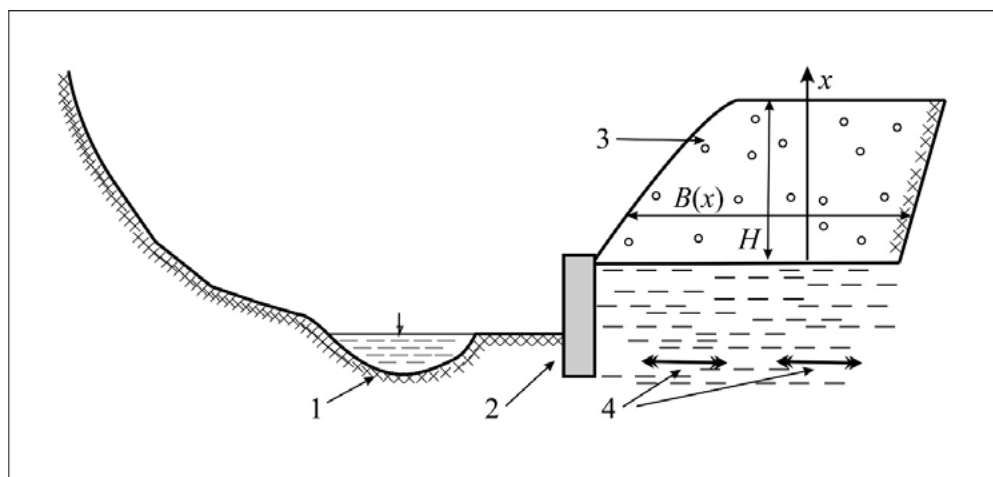


Рис. 1. Расчётная схема начально-краевой задачи. 1 – речной поток; 2 – подпорная стена; 3 – хвосты; 4 – сейсмическая волна /

Fig. 1. Calculation scheme of the initial boundary value problem. 1 – riverflow; 2 – retaining wall; 3 – tails; 4 – seismic wave

Углы наклона откосов массива не превышают угла естественного откоса материала отложения (37° – 45°). В настоящее время массив находится в статически устойчивом состоянии. Материал, слагающий массив, представляет сплошную деформируемую среду со своими физико-механическими характеристиками (модуль упругости, модуль сдвига, плотность материала, коэффициент внутреннего сопротивления движению, коэффициент Кулоновского трения, коэффициент сцепления). Данная работа посвящена проблеме колебательного движения рассматриваемого массива и возможного его перехода в динамически неустойчивое состояние в случае падения на его подстилающую поверхность сейсмической волны. Кроме того, к грани массива примыкает Транскавказская автомагистраль, где имеет место круглосуточное интенсивное движение автотранспорта. Тем самым массив находится в постоянном микроколебательном движении (дрожит). Не исключено, что в какой-то момент времени частота микроколебаний массива совпадет с частотой собственных колебаний массива. В этом случае, из-за резонанса, возникшие напряжения в массиве могут превзойти разрушающее напряжение материала массива. Массив окажется в динамически неустойчивом состоянии, что может привести к обрушению в пойму реки и даже вторжению массива в поток реки.

Известно, что поперечные сдвиговые колебания рыхлых массивов горной породы (оползневые массивы, отвалы, земляные дамбы, накопленный материал отло-

жений в хвостохранилищах и др.) механико-математически наиболее адекватно моделируются начально-краевыми задачами математической физики, поставленными для следующих дифференциальных уравнений в частных производных [Ворович и др., 1999; Кошляков и др., 1970; Скучик, 1971; Слепян, 1972; Шульман, 1976; Bonnet, Heize, 1995]:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - v_s^2 (1 + i\eta_*) \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \left(B \frac{\partial U}{\partial x} \right) = 0, \quad (0.1)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - v_s^2 \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \left(B \frac{\partial U}{\partial x} \right) - \beta_* v_s^2 \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \left(B \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial t} \right) = 0, \quad (0.2)$$

где приняты следующие обозначения: $U(x, t)$ – искомая функция выражающая поперечные сдвиговые перемещения в теле массива; $B(x)$ – ширина массива в общем случае зависящая от вертикальной координаты из-за трапецеидальной формы вертикального разреза в массиве, как показано на рисунке 1; i – мнимая единица; t – время; v_s – скорость распространения сдвиговых перемещений в массиве, которая вычисляется по формуле:

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (0.3)$$

где G – модуль сдвига; ρ – плотность материала массива.

Согласно гипотезе Е.С. Сорокина [Сорокин, 1956] в дифференциальном уравнении (0.1) через постоянный коэффициент η_* , называемый коэффициентом потерь, учтена диссипация энергии колебания на преодоление внутреннего сопротивления в среде. В дифференциальном уравнении (0.2) диссипация энергии учтена через коэффициент β_* называемый коэффициентом вязкого сопротивления в согласии с гипотезой Кельвина-Фойгта [Скучик, 1971; Слепян, 1972]. Оба эти априорные коэффициенты при гармоническом колебании среды взаимосвязаны зависимостью $\eta_* = \omega \beta_*$, где ω – круговая частота гармонических колебаний массива.

1. Постановка начально-краевых задач моделирующих поперечные сдвиговые сейсмические колебания массива

Согласно гипотезам Е.С. Сорокина и Кельвина-Фойгта поперечные сдвиговые сейсмические колебания рассматриваемого массива моделируются дифференциальными уравнениями (0.1) и (0.2) которые в развернутом виде запишутся так [Ворович и др., 1999; Заалишвили и др., 2007; Кошляков и др., 1970; Музаев и др., 2014; Хачиян, 2009]:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - v_s^2 (1 + i\eta_*) \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{B'(x)}{B(x)} \frac{\partial U}{\partial x} \right) = 0, \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - v_s^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{B'(x)}{B(x)} \frac{\partial U}{\partial x} \right) - \beta_* v_s^2 \left(\frac{\partial^3 U}{\partial x^2 \partial t} + \frac{B'(x)}{B(x)} \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial t} \right) = 0, \quad (1.2)$$

В соответствии с нашей целью для этих дифференциальных уравнений необходимо поставить следующие начальные и граничные условия:

$$U(x, t)|_{t=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial U(x, t)}{\partial t} \right|_{t=0} = 0, \quad (1.3)$$

$$U(x, t)|_{x=0} = \frac{k_s g}{\omega^2} e^{i\omega t}, \quad \left. \frac{\partial U(x, t)}{\partial x} \right|_{x=H} = 0, \quad (1.4)$$

где k_s – сейсмический коэффициент местности; ω – круговая частота подающей на подстилающую поверхность массива сейсмической волны. Величина $\frac{k_s g}{\omega^2}$ представляет амплитуду перемещения сейсмической волны вдоль подстилающей поверхности.

Дифференциальное уравнение (1.1) совместно с начальными условиями (1.3) и граничными условиями (1.4) в совокупности представляют начально-краевую задачу математической физики и моделируют сейсмические колебания рассматриваемого массива согласно гипотезе Е.С. Сорокина. Дифференциальное уравнение (1.2) совместно с начальными условиями (1.3) и граничными условиями (1.4) в совокупности представляют начально-краевую задачу математической физики и моделируют сейсмические колебания рассматриваемого массива согласно гипотезе Кельвина-Фойгта.

Фактически проблема смоделирована двумя разными начально-краевыми задачами математической физики в соответствии с принятыми во всем мире двумя гипотезами в классических научных литературных источниках. Пристальный интерес представляет вопрос о том, что в какой из двух составленных моделей наиболее адекватно и правдоподобно отражены физико-механические процессы, происходящие в колеблющемся массиве. В связи с этим в данной работе решены обе выше представленные начально-краевые задачи, сопоставлены между собой совокупности полученных расчетных формул, а также результаты вычислительных экспериментов по определению перемещений и напряжений в исследуемом колеблющемся массиве.

В дифференциальных уравнениях (1.1) и (1.2) один коэффициент является комплексной величиной, а другой коэффициент $\frac{B'(x)}{B(x)}$ – функцией от пространственной координаты x . Эти особенности в дифференциальных уравнениях, создают большие математические трудности в попытках решения задач аналитическими методами математической физики. В общем случае, при произвольной функции $\frac{B'(x)}{B(x)}$ задача не была решена никем в мире.

Мы предлагаем решение поставленных задач в одном частном случае, при экспоненциальной зависимости ширины $B(x)$ массива от координаты x :

$$B(x) = B_0 e^{Sx}, \quad (1.5)$$

где B_0 – ширина массива у её подстилающей поверхности. Форм параметр S определяется по следующей зависимости:

$$S = \frac{1}{H} \ln \frac{B(H)}{B(0)} = \text{const} \quad (1.6)$$

где $B(H)$ – ширина массива на свободной поверхности, $B(0)=B_0$ – ширина массива у её подстилающей поверхности, H – толщина (мощность) массива.

2. Решение начально-краевой задачи поставленной согласно с гипотезой Е.С. Сорокина

В этом случае, с учетом принятых упрощающих предположений (1.5) и (1.6) переменный коэффициент в дифференциальном уравнении (1.1) становится постоянной величиной. В результате применения следующей подстановки:

$$U(x, t) = A_0 e^{i\omega t} + e^{\frac{s}{2}x} V(x, t), \quad (2.1)$$

начально-краевая задача (1.1), (1.3), (1.4) через введенную функцию $V(x, t)$, перепишется так:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} - v_s^2 (1 + i\eta_*) \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - \frac{s^2}{4} V \right) = A_0 \omega^2 e^{i\omega t} e^{-\frac{s}{2}x}, \quad (2.2)$$

$$V|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad (2.3)$$

$$V|_{x=0} = 0, \quad \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{s}{2} V \right) \Big|_{x=H} = 0, \quad (2.4)$$

где:

$$A_0 = \frac{k_s g}{\omega^2}, \quad (2.5)$$

Решение дифференциального уравнения (2.2) можно искать в виде следующего тригонометрического ряда [Bonnet, Heize, 1995]:

$$V(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n(t) \sin \mu_n \frac{x}{H}, \quad (2.6)$$

где μ_n – положительные корни следующего трансцендентного уравнения:

$$\frac{\mu_n}{H} \cos \mu_n + \frac{s}{2} \sin \mu_n = 0. \quad \text{или} \quad \operatorname{tg} \mu_n = -\frac{2\mu_n}{sH} \quad (2.7)$$

Последовательность функций:

$$\sin \mu_1 \frac{x}{H}, \sin \mu_2 \frac{x}{H}, \dots, \sin \mu_n \frac{x}{H}, \dots \quad (2.8)$$

является ортогональной системой тригонометрических функций на интервале $(0; H)$. В связи с этим функцию $e^{-\frac{s}{2}x}$ можно разложить в ряд Фурье по ортогональной системе функций (2.8):

$$e^{-\frac{s}{2}x} = \sum_{n=1}^{\infty} \delta_n \sin \mu_n \frac{x}{H}. \quad (2.9)$$

Непосредственной проверкой можно убедиться в том, что выражение (2.6) удовлетворяет граничным условиям (2.4) если только μ_n корень характеристического уравнения (2.7). В результате подстановки рядов (2.6) и (2.9) в дифференциальное уравнение (2.2) и приравнивания коэффициентов при одинаковых синусах в левой и правой частях уравнения (2.2) относительно неизвестных функций $V_n(t)$ получается следующее обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2 V_n}{dt^2} + v_s^2 \left(\frac{\mu_n^2}{H^2} + \frac{s^2}{4} \right) (1 + i\eta_*) V_n = A_0 \omega^2 e^{i\omega t} \delta_n \quad (2.10)$$

с двумя нулевыми начальными условиями:

$$V_n|_{t=0} = 0, \quad \left. \frac{dV_n}{dt} \right|_{t=0} = 0, \quad (2.11)$$

$$\delta_n = \frac{\int_0^H e^{\frac{S}{2}x} \sin \mu_n \frac{x}{H} dx}{\int_0^H \sin^2 \mu_n \frac{x}{H} dx}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (2.12)$$

Коэффициент дифференциального уравнения (2.10) представляет комплексную величину $(1+i\eta_*)$. Теория обыкновенных дифференциальных уравнений с комплексными коэффициентами до настоящего времени не разработана, и в справочных литературных источниках по математике она не отражена. В связи с этим вынуждены выделить из (2.10) действительную и мнимую части в следующей последовательности:

$$\begin{aligned} V_n(t) &= \varphi_n(t) + i\psi_n(t) \\ \frac{d^2 \varphi_n}{dt^2} + v_s^2 r_n^2 \varphi_n - v_s^2 r_n^2 \eta_* \psi_n &= A_0 \omega^2 \delta_n \cos \omega t, \\ \frac{d^2 \psi_n}{dt^2} + v_s^2 r_n^2 \psi_n + v_s^2 r_n^2 \eta_* \varphi_n &= A_0 \omega^2 \delta_n \sin \omega t, \\ \varphi_n|_{t=0} = \varphi'_n|_{t=0} = \psi_n|_{t=0} = \psi'_n|_{t=0} &= 0, r_n = \sqrt{\frac{\mu_n^2}{H^2} + \frac{S^2}{4}} \\ \frac{d^4 \varphi_n}{dt^4} + 2a^2 r_n^2 \frac{d^2 \varphi_n}{dt^2} + v_s^4 r_n^4 (1 + \eta_*^2) \varphi_n &= R_1 \cos \omega t + R_2 \sin \omega t, \\ \frac{d^4 \psi_n}{dt^4} + 2v_s^2 r_n^2 \frac{d^2 \psi_n}{dt^2} + v_s^4 r_n^4 (1 + \eta_*^2) \psi_n &= -R_2 \cos \omega t + R_1 \sin \omega t, \\ R_1 &= A_0 \omega^2 \delta_n (v_s^2 r_n^2 - \omega^2), R_2 = A_0 \omega^2 \delta_n v_s^2 r_n^2 \eta_*, \\ \varphi_n|_{t=0} = \varphi'_n|_{t=0} = \psi_n|_{t=0} = \psi'_n|_{t=0} &= 0, \end{aligned}$$

При $t \rightarrow \infty$ φ_n и ψ_n ограничены:

$$\begin{aligned} \varphi_n(t) &= \frac{1}{\Delta_n} \left[R_{1,n} \left(\cos \omega t - e^{-\alpha_n t} \cos \beta_n t + \frac{\alpha_n}{\beta_n} e^{-\alpha_n t} \sin \beta_n t \right) + \right. \\ &\quad \left. + R_{2,n} \left(\sin \omega t - \frac{\omega}{\beta_n} e^{-\alpha_n t} \sin \beta_n t \right) \right] \\ \psi_n(t) &= \frac{1}{\Delta_n} \left[R_{1,n} \left(\sin \omega t - \frac{\omega}{\beta_n} e^{-\alpha_n t} \sin \beta_n t \right) - \right. \\ &\quad \left. - R_{2,n} \left(\cos \omega t - e^{-\alpha_n t} \cos \beta_n t - \frac{\alpha_n}{\beta_n} e^{-\alpha_n t} \sin \beta_n t \right) \right] \\ \alpha_n &= v_s r_n \sqrt{\frac{\sqrt{1+\eta_*^2}-1}{2}}, \beta_n = v_s r_n \sqrt{\frac{\sqrt{1+\eta_*^2}+1}{2}}, \delta_n = \frac{4\mu_n \int_0^H e^{\frac{S}{2}x} \sin \mu_n \frac{x}{H} dx}{(2\mu_n - \sin 2\mu_n)H}, \\ \Delta_n &= (v_s^2 r_n^2 - \omega^2)^2 + (v_s^2 r_n^2 \eta_*)^2, \end{aligned}$$

Обратным ходом, следуя по выражениям (2.6) – (2.4) и далее, для вычисления сдвиговых сейсмоперемещений на вершине (гребне) массива, а также для сдвиговых сейсмонапряжений на подстилающей поверхности массива получается следующая совокупность расчетных формул:

$$\begin{aligned} U(H, t) &= A_0 \cos \omega t - e^{\frac{S}{2}H} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ e^{-\alpha_n t} \left[\frac{R_{1,n}}{\Delta_n} \cos \beta_n t + \left(\frac{\alpha_n}{\beta_n} \frac{R_{1,n}}{\Delta_n} + \frac{\omega}{\beta_n} \frac{R_{2,n}}{\Delta_n} \right) \sin \beta_n t \right] - \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{R_{1,n}}{\Delta_n} \cos \omega t + \frac{R_{2,n}}{\Delta_n} \sin \omega t \right) \right\} \sin \mu_n \\ \tau(0, t) &= -G \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ e^{-\alpha_n t} \left[\frac{R_{1,n}}{\Delta_n} \cos \beta_n t + \left(\frac{\alpha_n}{\beta_n} \frac{R_{1,n}}{\Delta_n} + \frac{\omega}{\beta_n} \frac{R_{2,n}}{\Delta_n} \right) \sin \beta_n t \right] - \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{R_{1,n}}{\Delta_n} \cos \omega t + \frac{R_{2,n}}{\Delta_n} \sin \omega t \right) \frac{\mu_n}{H} \right\} \end{aligned}$$

3. Решение начально-краевой задачи поставленной согласно с гипотезой Кельвина-Фойгта

Также как в предыдущем разделе 2 в этом случае в результате применения подстановки (2.1) начально-краевая задача (1.2), (1.3), (1.4) относительно новой искомой функции $V(x, t)$ переписывается так:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} - v_s^2 \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - \frac{S^2}{4} V \right) - \beta_* v_s^2 \left(\frac{\partial^3 V}{\partial t \partial x^2} - \frac{S^2}{4} \frac{\partial^2 V}{\partial t \partial x} \right) = A_0 \omega^2 e^{i\omega t} e^{-\frac{S}{2}x}, \quad (3.1)$$

$$V|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad (3.2)$$

$$V|_{x=0} = 0, \quad \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{S}{2} V \right) \Big|_{x=H} = 0, \quad (3.3)$$

В результате разложения в тригонометрические ряды функций $V(x, t)$ и $e^{-\frac{S}{2}x}$ в соответствии с разложением (2.6) и (2.8) для искомой функции $V_n(t)$ получается следующее обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2 V_n}{dt^2} + v_s^2 r_n^2 \beta_* \frac{dV_n}{dt} + v_s^2 r_n^2 V_n = A_0 \omega^2 e^{i\omega t} \delta_n, \quad (3.4)$$

со следующими двумя начальными условиями:

$$V_n|_{t=0} = 0, \quad \frac{dV_n}{dt} \Big|_{t=0} = 0. \quad (3.5)$$

Решение поставленной задачи Коши (3.4) – (3.5) имеет следующий вид:

$$V_n(t) = \begin{cases} -B e^{-\alpha_n t} \left[\left(\frac{\alpha_n}{\beta_n} + i \frac{\omega}{\beta_n} \right) \sin \beta_n t + \cos \beta_n t \right] + B e^{i\omega t}, & n \leq k \\ B \frac{-(\lambda_2 + i\omega)e^{-\lambda_1 t} + (\lambda_1 + i\omega)e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} + B e^{i\omega t}, & n > k \end{cases}$$

$$B = \frac{A_0 \omega^2 \delta_n [(a^2 r_n^2 - \omega^2) - i \beta_* a^2 r_n^2 \omega]}{(a^2 r_n^2 - \omega^2)^2 + \beta_*^2 a^4 r_n^4 \omega^2},$$

$$\alpha_n = \frac{\beta_* a^2 r_n^2}{2}, \beta_n = a r_n \sqrt{1 - \frac{\beta_*^2 a^2 r_n^2}{4}}, \lambda_1 = \alpha_n - \bar{\beta}_n, \lambda_2 = \alpha_n + \bar{\beta}_n,$$

$$\bar{\beta}_n = a r_n \sqrt{\frac{\beta_*^2 a^2 r_n^2}{4} - 1}, r_n = \sqrt{\frac{\mu_n^2}{H^2} + \frac{S^2}{4}}$$

Далее обратным ходом и выделения действительной части из полученных комплексных выражений для перемещения на гребне рассматриваемого массива и для напряжения на подстилающей поверхности массива получена следующая совокупность расчетных формул:

$$U(H, t) = A_0 \cos \omega t + e^{\frac{S}{2}H} \sum_{n=1}^{\infty} [V_n(t) + B_{1,n} \cos \omega t + B_{2,n} \sin \omega t] \sin \mu_n,$$

$$\tau(0, t) = G \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n}{H} [V_n(t) + B_{1,n} \cos \omega t + B_{2,n} \sin \omega t],$$

$$V_n(t) = \begin{cases} -e^{-\alpha_n t} \left[\left(\frac{\alpha_n}{\beta_n} B_{1,n} + \frac{\omega}{\beta_n} B_{2,n} \right) \sin \beta_n t + B_{1,n} \cos \beta_n t \right], & n \leq k \\ \frac{B_{1,n} (\lambda_1 e^{-\lambda_2 t} - \lambda_2 e^{-\lambda_1 t}) - \omega B_{2,n} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}{\lambda_2 - \lambda_1}, & n > k \end{cases}$$

$$B_{1,n} = \frac{A_0 \omega^2 \delta_n (a^2 r_n^2 - \omega^2)}{\Delta_n}, B_{2,n} = \frac{A_0 \omega^3 \beta_* a^2 r_n^2 \delta_n}{\Delta_n}$$

$$\Delta_n = (a^2 r_n^2 - \omega^2)^2 + \beta_*^2 a^4 r_n^4 \omega^2$$

Натуральное число « k » определяется из следующего неравенства:

$$\mu_n < \frac{2}{\beta_* a}$$

4. Математический анализ полученных двух совокупностей расчетных формул. Компьютерные вычислительные эксперименты и их сопоставления

В частном случае, при нулевом значении форм параметра $S=0$, полученные две совокупности расчетных формул незначительно упрощаются и принимают следующие виды.

Совокупность расчетных формул в рамках гипотезы Е.С. Сорокина:

$$U(H, t) = A_0 \cos \omega t - \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha_n t} f_{1,n}(t) \sin a_n H + \sum_{n=1}^{\infty} f_{2,n}(t) \sin a_n H, \quad (4.1)$$

$$\tau(0, t) = - \sum_{n=1}^{\infty} a_n e^{-\alpha_n t} f_{1,n}(t) + \sum_{n=1}^{\infty} a_n f_{2,n}(t), \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{(2n-1)\pi}{2H}, \alpha_n = v_s a_n \sqrt{\frac{\sqrt{1+\omega^2 \beta_*^2} - 1}{2}}, \beta_n = v_s a_n \sqrt{\frac{\sqrt{1+\omega^2 \beta_*^2} + 1}{2}}, \delta_n = \frac{2}{a_n H}, \\ \Delta &= (v_s^2 a_n^2 - \omega^2)^2 + (v_s^2 a_n^2 \eta_*)^2, \\ f_{1,n}(t) &= \frac{R_{1,n}}{\Delta_n} \cos \beta_n t + \left(\frac{\alpha_n R_{1,n}}{\beta_n \Delta_n} + \frac{\omega R_{2,n}}{\beta_n \Delta_n} \right) \sin \beta_n t \\ f_{2,n}(t) &= \frac{R_{1,n}}{\Delta_n} \cos \omega t + \frac{R_{2,n}}{\Delta_n} \sin \omega t \\ R_{1,n} &= A_0 \omega^2 \delta_n (v_s^2 a_n^2 - \omega^2), R_{2,n} = A_0 \omega^2 \delta_n v_s^2 a_n^2 \eta_* \end{aligned}$$

Совокупность расчетных формул в рамках гипотезы Кельвина-Фойгта:

$$\begin{aligned} U(H, t) &= A_0 \cos \omega t - \sum_{n=1}^k V_n(t) e^{-\alpha_n t} \sin a_n H + \frac{1}{2} \sum_{n=k+1}^{\infty} \bar{V}_n(t) \sin a_n H + \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} (B_{1,n} \cos \omega t + B_{2,n} \sin \omega t) \sin a_n H \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \tau(0, t) &= -G \sum_{n=1}^k a_n V_n(t) e^{-\alpha_n t} + \frac{G}{2} \sum_{n=k+1}^{\infty} a_n \bar{V}_n(t) \sin a_n H + \\ &+ G \sum_{n=1}^{\infty} a_n (B_{1,n} \cos \omega t + B_{2,n} \sin \omega t), \\ V_n(t) &= B_{1,n} \cos \beta_n t + \left(\frac{\omega}{\beta_n} B_{2,n} + \frac{\alpha_n}{\beta_n} B_{1,n} \right) \sin \beta_n t \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_n(t) &= \left[\left(\frac{\alpha_n}{\beta_n} - 1 \right) B_{1,n} + \frac{\omega}{\beta_n} B_{2,n} \right] e^{-(\alpha_n + \bar{\beta}_n)t} - \\ &- \left[\left(\frac{\alpha_n}{\bar{\beta}_n} + 1 \right) B_{1,n} + \frac{\omega}{\bar{\beta}_n} B_{2,n} \right] e^{-(\alpha_n - \bar{\beta}_n)t} \\ \alpha_n &= \frac{\beta_* v_s^2 a_n^2}{2}, \beta_n = v_s a_n \sqrt{1 - \frac{\beta_*^2 v_s^2 a_n^2}{4}}, \bar{\beta}_n = v_s a_n \sqrt{\frac{\beta_*^2 v_s^2 a_n^2}{4} - 1}, \\ \Delta_n &= (v_s^2 a_n^2 - \omega^2)^2 + \beta_*^2 v_s^4 a_n^4 \omega^2 \\ B_{1,n} &= \frac{A_0 \omega^2 \delta_n (v_s^2 a_n^2 - \omega^2)}{\Delta_n}, B_{2,n} = \frac{A_0 \omega^3 \beta_* \delta_n v_s^2 a_n^2}{\Delta_n}. \end{aligned}$$

Результаты работы и их обсуждение

Выполнены вычислительные эксперименты по совокупности расчетных формул (4.1) и (4.2) полученных в рамках гипотезы Е.С. Сорокина и по совокупности расчетных формул (4.3) и (4.4) полученных в рамках гипотезы Кельвина-Фойгта.

В качестве конкретных примеров рассмотрены два варианта. В первом варианте входным параметрам присваивались следующие числовые значения: мощность (толщина) массива $H = 100$ м; модуль сдвига материала массива $G = 7,2 \cdot 10^8$ Н/м²; плотность материала $\rho = 2000$ кг/м³; коэффициент вязкого сопротивления $\beta_* = 0,02$ с; коэффициент потерь в модели Е.С. Сорокина $\eta_* = \beta_* \omega$, где ω – круговая частота колебаний массива, т.е. круговая частота падающей сейсмической волны; амплитуде падающей на подстилающую поверхность массива гармонической сейсмической волны присваивалось значение $A_0 = 0,004$ м; а её круговой частоте присваивали значение первой (основной) резонансной частоты $\omega = \omega_1 = v_s \cdot a_1 = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \frac{\pi}{2H} = 3\pi$.

Эти числовые значения входных параметров примерно соответствуют физико-механическим характеристикам пород поверхностных слоев земли (галечник, гравий, туфы) и семибалльной интенсивности землетрясения [Шульман, 1976; Заалишвили, 2009; Аптикаев, 2020; Заалишвили и др., 2007; Курбацкий и др., 2016; Huang Jyun-Yan et al., 2020; Yin-Min Wu et al., 2003; Zaalishvili et al., 2019a, b, 2021].

На рисунке 2 представлены графики зависимости от времени перемещений гребня массива вычисленные по моделям Е.С. Сорокина и Кельвина-Фойгта, т.е. графики зависимости функции $U(H,t)$, вычисленные по формулам (4.1) и (4.3).

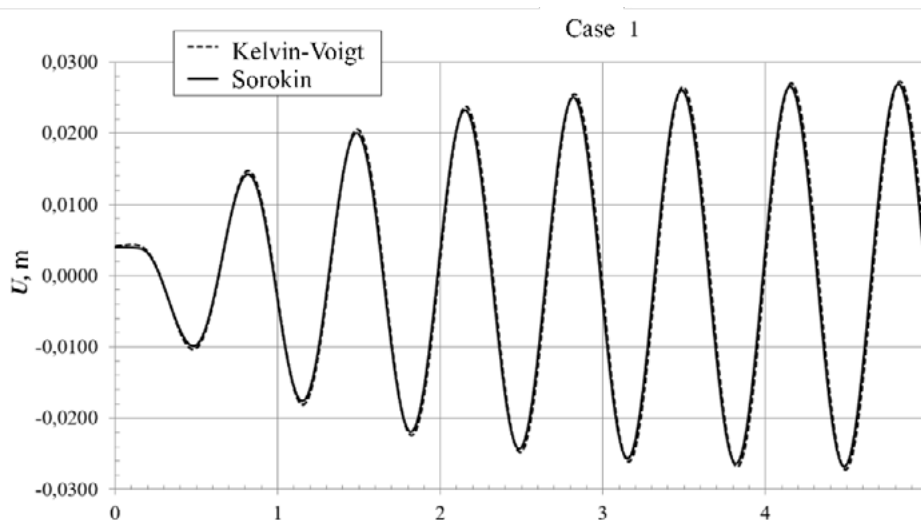


Рис. 2. Графики зависимости от времени перемещений гребня массива вычисленные по моделям Е.С. Сорокина и Кельвина-Фойгта /

Fig. 2. Graphs of the dependence on the time of movement of the ridge of the array calculated from the models of E.S. Sorokin and Kelvin-Voigt

На рис. 3 представлены графики зависимости от времени сейсмонапряжений $\tau(0,t)$ на подстилающей поверхности массива, вычисленные по формулам (4.2) и (4.4) в соответствии с гипотезой С.А. Сорокина и гипотезой Кельвина-Фойгта.

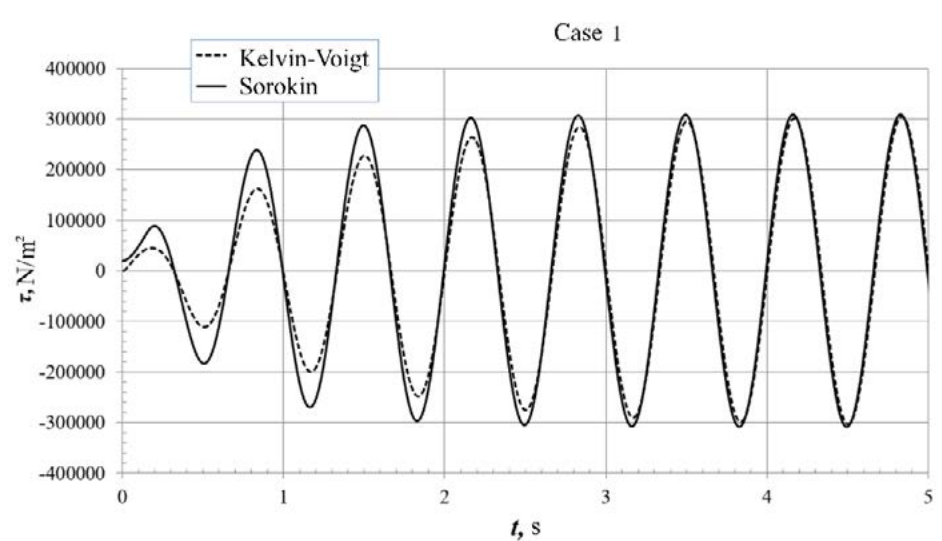


Рис. 3. Графики зависимости от времени сейсмонапряжений $\tau(0,t)$ на подстилающей поверхности массива вычисленные по моделям Е.С. Сорокина и Кельвина-Фойгта /

Fig. 3. Graphs of the dependence on the time of seismic stresses $\tau(0,t)$ on the underlying surface of the array calculated from the models of E.S. Sorokin and Kelvin-Voigt

На рисунках 4 и 5 представлены аналогичные графики для второго варианта, в котором мощность массива $H = 75$ м. Остальным входным параметрам присвоены значения от первого варианта.

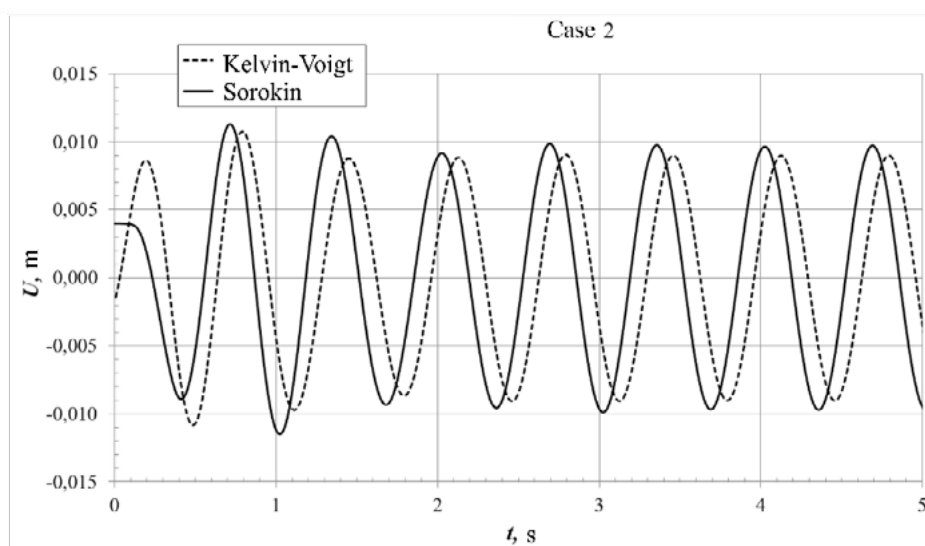


Рис. 4. Графики зависимости от времени перемещений гребня массива вычисленные по моделям Е.С. Сорокина и Кельвина-Фойгта /

Fig. 4. Graphs of the dependence on the time of movement of the ridge of the array calculated from the models of E.S. Sorokin and Kelvin-Voigt

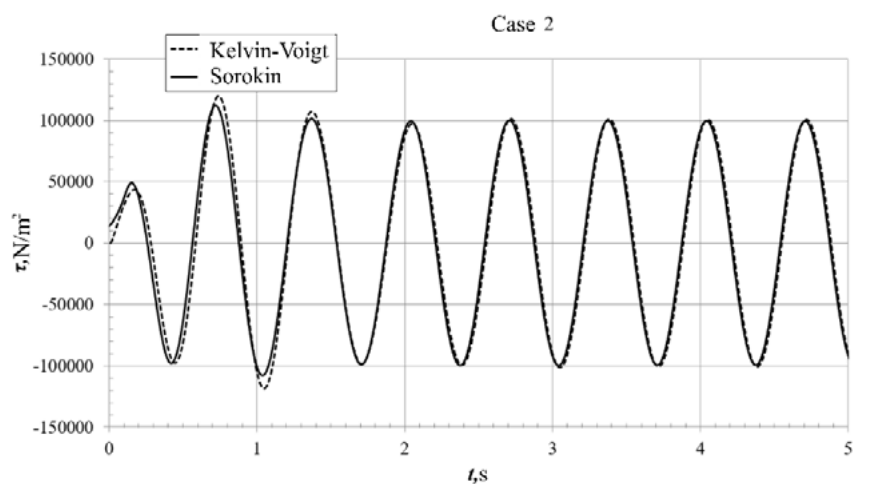


Рис. 5. Графики зависимости от времени сейсмонапряжений $\tau(0,t)$ на подстилающей поверхности массива вычисленные по моделям Е.С. Сорокина и Кельвина-Фойгта /

Fig. 5. Graphs of the dependence on the time of seismic stresses $\tau(0,t)$ on the underlying surface of the array calculated from the models of E.S. Sorokin and Kelvin-Voigt

Проведенные сопоставительные вычислительные эксперименты показали следующее. Рассмотренные в статье общеизвестные два механико-математические модели одного и того-же сейсмоколебательного процесса в массиве визуально (внешне) существенно отличаются, так же как существенно отличаются друг от друга совокупности расчетных формул, полученных на основе рассмотренных двух моделей. Тем не менее, числовые результаты по напряжениям и деформациям в колеблющемся массиве полученные на основе рассмотренных двух моделей практически идентичны.

Максимальное касательное напряжение в рассматриваемом примере составляет $\tau_{max}=3 \cdot 10^5$ Н/м². Такая величина сейсмонапряжения в 1,5 раза превосходит несущую способность мелких песчаных и глинистых грунтов. Тем самым создается серьезная опасность обрушения массива в речной поток.

ВЫВОДЫ

Поставлены и решены две начально-краевые задачи математической физики, моделирующие сдвиговые сейсмические колебания массива, состоящего из отходного материала хвостохранилища. Движение массива вызвано падением сейсмической волны на его подстилающую поверхность. Пристальный взгляд к подобным прикладным задачам обусловлен тем, что нередко такие массивы расположены в узком ущелье реки, вблизи речного потока. При сеймотектонических ситуациях создается потенциальная экологическая опасность речной системе региона из-за возможного обрушения в речной поток токсичного материала массива.

Одна задача поставлена и решена в рамках гипотезы Е.С. Сорокина, относительно диссипации энергии, обусловленной внутренним сопротивлением среды. Другая задача поставлена и решена в рамках гипотезы Кельвина-Фойгта.

Доказано утверждение о том, что, хотя математическая модель колебательного процесса в массиве, основанная на гипотезе Е.С. Сорокина, визуально существенно отличается от математической модели колебательного процесса в том же массиве,

основанная на гипотезе Кельвина-Фойгта, однако по числовым значениям напряженно-деформированного состояния колеблющегося массива эти две общеизвестные модели практически идентичны.

Доказано утверждение о том, что в случае падения на массив околорезонансной сейсмической волны, интенсивностью от семи баллов и выше, в массиве провоцируются сейсмонапряжения, в разы превосходящие несущую способность мелких песчаных и глинистых грунтов, имеющих сходство с материалом хвостохранилища. Тем самым создается опасность обрушения массива в пойму реки.

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. Ворович И.И., Бабешко В.А., Пряхина О.Д. Динамика массивных тел и резонансные явления в деформируемых средах. – М.: Научный Мир, 1999. – 246 с.
3. Гурбанов А.Г. и др. Промышленные отходы Мизурской горно-обогатительной фабрики Садонского свинцово-цинкового комбината: геохимические особенности, оценка их воздействия на экологическую обстановку прилегающих территорий (почвы и воду р. Ардон). Республика Северная Осетия-Алания. // Вестник Владикавказского научного центра РАН. – 2012. – Т. 12. №4. – С. 29–40.
4. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. – М.: Наука, 2009. – 350 с.
5. Заалишвили В.Б., Музаев И.Д., Туаева Ж.Д. Математическое моделирование сейсмических колебаний грунтовой толщи в основании застройки. // Труды международной научно-практической конференции «Опасные природные и техногенные геологические процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа». – Владикавказ. – 2007. – С. 290–298.
6. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Высшая школа, 1970. – 767 с.
7. Курбацкий Е.М., Косауров А.П. К вопросу о пересчете балльности в ускорения колебаний грунта. // Инженерные изыскания. – 2016. – №14. – С. 50–60.
8. Матвеев А.А. и др. Геохимическая оценка воздействия Унальского хвостохранилища Садонского свинцово-цинкового комбината (Северная Осетия-Алания) на окружающую среду. // Известия секции наук о Земле Российской академии наук. – 2004. – Вып. 12. – С. 136–147.
9. Музаев И.Д., Музаев Н.И., Харебов К.С. Постановка и решение многослойной краевой задачи сейсмических колебаний высотного сооружения. // Сейсмическое строительство, безопасность сооружений. – 2014. – №1. – С. 22–25.
10. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. – М.: МИР, 1971. – 274 с.
11. Слепян Л.И. Нестационарные упругие волны. – Л.: Судостроение, 1972. – 371 с.
12. Сорокин Е.С. Динамический расчет несущих конструкций зданий. – М.: Госстройиздат, 1956. – 336 с.
13. Хачиян Э.Е. Задача усиления или ослабления эффекта сейсмического воздействия на поверхности земли. // Вестник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко «Исследования по теории сооружений». 2009. – №1(XXVI). – С. 67–80.
14. Шульман С.Г. Расчеты сейсмостойкости гидросооружений с учетом влияния водной среды. – М.: Энергия, 1976. – 336 с.
15. Bonnet G., Heize J.F. Non linear seismic response of a soft layer. // 10th European conference on Earthquake Engineering. Duma (et). – Balkema, Rotterdam. – 1995. – pp. 361–364.
16. 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. No.2. – pp. 95-112. DOI: 10.46698/VNC.2020.28.93.007.

17. 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.

18. Zaalishvili V.B., Burdzieva O.G., Kanukov A.S., Melkov D.A. Seismic Risk of Modern City. // *The Open Construction & Building Technology Journal*. – 2019. – Vol. 13. – pp. 308-318. DOI: 10.2174/1874836801913010308

19. Zaalishvili V.B., Chernov Yu.K. The influence of the rate of increase of ground vibration accelerations during earthquakes on the value of the observed macroseismic effect. // *Open Construction and Building Technology Journal*. – 2021. – Vol. 15. – pp. 70-80. DOI: 10.2174/1874836802115010070

20. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A.S., Fidarova M.I., Persaeva Z.V. Vladikavkaz city seismological network database. // *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. "Advances in Intelligent Systems and Computing"*. – 2021. – pp. 57-63. DOI: 10.1007/978-3-030-57453-6_6

References

1. Aptikaev F.F. New building codes: one step forward, two steps back. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2020. Vol. 10. No. 2. pp. 71–81. DOI: 10.46698/VNC.2020.50.57.005 (In Russ.)

2. Vorovich I.I., Babeshko V.A., Pryakhina O.D. Dynamics of massive bodies and resonance phenomena in deformable media. Moscow, Nauchnyi Mir, 1999. – 246 p. (In Russ.)

3. Gurbanov A.G. Industrial wastes of the Mizurmining and processing plant of the Sadon lead-zinc plant: geochemical features, assessment of their impact on the environmental situation of adjacent territories (soils and water of the Ardon River). Republic of North Ossetia-Alania. Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center of RAS. 2012. Vol. 12. No.4. pp. 29–40. (In Russ.)

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

5. Zaalishvili V.B., Muzaev I.D., Tuaeva Zh.D. Mathematical modeling of seismic vibrations of the soil stratum at the base of the building. In: *Proceedings Dangerous natural and technogenic geological processes in the mountainous and foothill areas of the North Caucasus*. Vladikavkaz. 2007. pp. 290–298. (In Russ.)

6. Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. Equations in partial derivatives of mathematical physics. Moscow. Higher School, 1970. 767 p. (In Russ.)

7. Kurbatsky E.M., Kosaurov A.P. On the issue of recalculating the intensity in the acceleration of ground vibrations. *Engineering survey*. 2016. No. 14. pp. 50–60. (In Russ.)

8. Matveev A.A. Geochemical assessment of the impact of the Unal tailing dump of the Sadonsky lead-zinc plant (North Ossetia-Alania) on the environment. In: *Proceedings of the Earth Sciences Section of RAS*. 2004. Issue 12. pp. 136–147. (In Russ.)

9. Muzaev I.D., Muzaev N.I., Kharebov K.S. Statement and solution of a multilayer boundary value problem of seismic vibrations of a high-rise structure. *Seismic construction, safety of structures*. 2014. No. 1. pp. 22–25. (In Russ.)

10. Skuchik E. Simple and complex vibratory systems. Moscow. MIR, 1971. 274 p. (In Russ.)

11. Slepyan L.I. Non-stationary elastic waves. Leningrad. Sudostroenie, 1972. 371 p. (In Russ.)

12. Sorokin E.S. Dynamic calculation of load-bearing structures of buildings. Moscow: Gosstroyizdat, 1956. – 336 p. (In Russ.)

13. Khachiyan E.E. The task of strengthening or weakening the effect of seismic load on the earth's surface. Bulletin of TsNIISK named after V.A. Kucherenko, Research on the theory of structures. 2009. No. 1(XXVI). pp. 67–80. (In Russ.)

14. Shulman S.G. Calculations of seismic resistance of hydraulic structures, taking into account the influence of the aquatic environment. Moscow. Energiya, 1976. 336 p. (In Russ.)

15. Bonnet G., Heize J.F. Non linear seismic response of a soft layer. In: 10th European conference on Earthquake Engineering. Duma (et). Balkema, Rotterdam. 1995. pp. 361–364.
16. 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. No.2. pp. 95–112. DOI: 10.46698/VNC.2020.28.93.007.
17. 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. Issue 1. pp. 386–396.
18. Zaalishvili V.B., Burdzieva O.G., Kanukov A.S., Melkov D.A. Seismic Risk of Modern City. *The Open Construction & Building Technology Journal*. 2019. Vol. 13. pp. 308–318. DOI: 10.2174/1874836801913010308
19. Zaalishvili V.B., Chernov Yu.K. The influence of the rate of increase of ground vibration accelerations during earthquakes on the value of the observed macroseismic effect. *Open Construction and Building Technology Journal*. 2021. Vol. 15. pp. 70–80. DOI: 10.2174/1874836802115010070
20. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A.S., Fidarova M.I., Persaeva Z.V. Vladikavkaz city seismological network database. In: *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. pp. 57–63. DOI: 10.1007/978-3-030-57453-6_6

УДК 550.34:551.1(082)

DOI: [10.46698/VNC.2022.25.32.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.25.32.003)

Оригинальная статья

Современная геодинамика и сейсмичность Северного Кавказа: проблемы мониторинга

В.В. Стогний¹, В.Б. Заалишвили¹, Н.Л. Пономарева²

¹Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: stogny_vv@mail.ru;

²Сейсмическая станция «Махачкала» ФИЦ ЕГС РАН, Россия, 367010, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Ахундова, 136

Статья поступила: 21.04.2022, доработана: 20.05.2022, принята к публикации: 25.05.2022

Резюме: Актуальность работы. Северный Кавказ является одним из наиболее сейсмоопасных регионов России, в пределах которого функционируют сети сейсмического и геодинамического GPS-мониторинга, на основе интерпретации которых ставятся и решаются разнообразные задачи, актуален поиск новых направлений их эффективного использования. **Цель работы** – рассмотрение возможностей комплексного анализа мониторинга современных геодинамических процессов и сейсмичности существующей сетью станций и лабораторий Северного Кавказа для оценки состояния геодинамического развития как основы при разработке методики оценки геоэкологических рисков. **Методы исследования.** Методы и методика работы заключались в обзоре и анализе возможностей систем мониторинга современных геодинамических процессов и сейсмичности Северного Кавказа и, на этой основе, поиске и обоснованию новых направлений их эффективного комплексного использования. **Результаты работы.** На основе анализа возможностей сейсмического и GPS-мониторинга территории Северного Кавказа сформулированы задачи, направленные на выявление глубинных источников тектонических напряжений и их возможной связи с приповерхностной геодинамикой и сейсмическим режимом, которые могли бы стать основой геоэкологического районирования. При сопоставлении материалов GPS-наблюдений со схемой блокового строения кристаллического фундамента Большого Кавказа, составленной по данным интерпретации гравитационного и магнитного полей, было выявлено, что существует закономерная связь между направлениями векторов скорости перемещения GPS-пунктов в пределах проекций этих блоков. Это позволяет ставить в качестве одной из задач исследований поиск связи глубинной геодинамики на уровне отдельных блоков кристаллического фундамента с условиями, существующими на поверхности. Для проведения таких исследований благоприятным объектом, обеспеченным наиболее плотной сетью станций GPS и сейсмического мониторинга, представляется северо-осетинская часть центрального сектора Большого Кавказа. Поиск связи глубинных геодинамических процессов и неотектонического строения верхних горизонтов разрезов с особенностями распределения векторов скорости пунктов GPS-наблюдений и сейсмическим режимом данной территории может быть выполнен на основе моделей, учитывающих реологические свойства структурно-вещественных комплексов и поля тектонических напряжений данного региона.

Ключевые слова: сейсмичность, GPS-геодинамика, мониторинг, Северный Кавказ, кристаллический фундамент.

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию ФГБУН Геофизического института ВНЦ РАН, код: FMSM-2022-0013.

Для цитирования: Стогний В.В., Заалишвили В.Б., Пономарева Н.Л. Современная геодинамика и сейсмичность Северного Кавказа: проблемы мониторинга. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12(2): 34-52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003.

DOI: [10.46698/VNC.2022.25.32.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.25.32.003)

Original paper

Modern geodynamics and seismicity of the North Caucasus: problems of monitoring

V.V. Stogny¹, V.B. Zaalishvili¹, N.L. Ponomareva²

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

Seismic station "Makhachkala" FIC UGC RAS, 136 Akhundova Str., Makhachkala 367010, Russian Federation

Received: 21.04.2022, revised: 20.05.2022, accepted: 25.05.2022

Abstract: Relevance. The North Caucasus is one of the most seismically hazardous regions of Russia, within which seismic and geodynamic GPS monitoring networks operate, on the basis of the interpretation of which various tasks are set and solved, and it is important to search for new directions for their effective use. **Aim.** The purpose of the work is to consider the possibilities of a comprehensive analysis of monitoring modern geodynamic processes and seismicity by the existing network of stations and laboratories in the North Caucasus to assess the state of geodynamic development as a basis for developing a methodology for assessing geoecological risks. **Methods.** The methods and methodology of the work consisted in reviewing and analyzing the capabilities of monitoring systems for modern geodynamic processes and seismicity in the North Caucasus and, on this basis, searching for and substantiating new directions for their effective integrated use. **Results:** Based on the analysis of the possibilities of seismic and GPS monitoring of the North Caucasus territory, tasks are formulated aimed at identifying deep sources of tectonic stresses and their possible connection with near-surface geodynamics and seismic regime, which could become the basis of geoecological zoning. When comparing the materials of GPS observations with the scheme of the crystalline basement block structure of the Greater Caucasus, compiled according to the interpretation of the gravitational and magnetic fields, it was revealed that there is a regular relationship between the directions of the movement velocity vectors of GPS points within the projections of these blocks. This makes it possible to set as one of the research tasks the search for a relationship between deep geodynamics at the level of individual blocks of the crystalline basement and the conditions existing on the surface. For such studies, the North-Ossetian part of the central sector of the Greater Caucasus seems to be a favorable object, provided with the densest network of GPS and seismic monitoring stations. The search for a connection between deep geodynamic processes and the neotectonic structure of the upper horizons of the sections with the features of the distribution of velocity vectors of GPS observation points and the seismic regime of a given territory can be performed on the basis of models in which must take into account the rheological properties of structural-material complexes and the tectonic stress field of this region.

Keywords: seismicity, GPS geodynamics, monitoring, North Caucasus, crystalline basement.

Acknowledgment: This work was carried out according to the state assignment of the Geophysical Institute of the All-Russian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, code: FMSM-2022-0013.

For citation: Stogny V.V., Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Ponomareva N.L. Modern geodynamics and seismicity of the North Caucasus: problems of monitoring. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12(2): 34-52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003.

Введение

Кавказ как геодинамическая система на стыке Восточноевропейской и Аравийской литосферных плит характеризуется высокой сейсмичностью. Первые систематические сведения об исторических землетрясениях на этой территории были представлены в «Каталоге землетрясений Российской империи» [Мушкетов, Ор-

лов, 1893], изданном Русским географическим обществом в качестве XXVI тома серии «Записки по общей географии». Фрагмент «Карты распространения землетрясений...», как приложения к каталогу, охватывающий Большой Кавказ и прилегающие области, показан на рисунке 1.

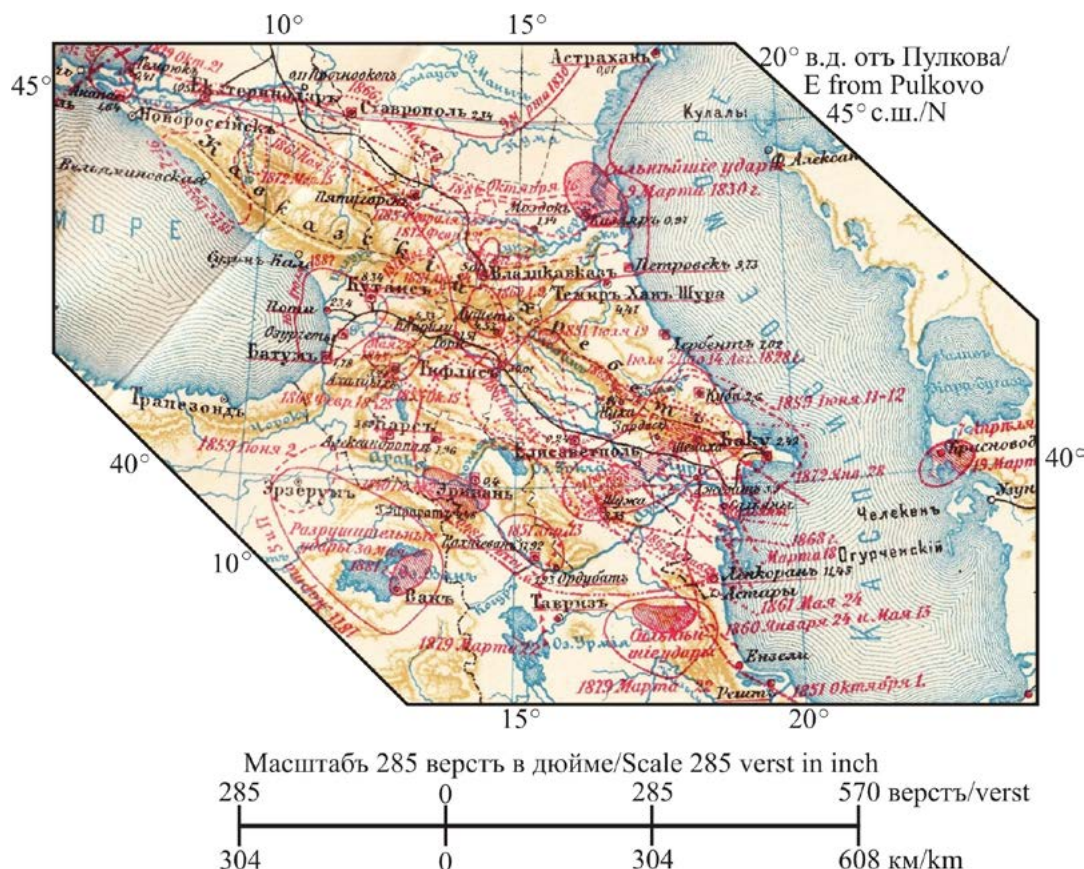


Рис. 1. Фрагмент из «Карта распространения землетрясений въ Россіи съ пограничными областями» по [Мушкетов, Орлов, 1893] (1 верста – 1,0668 км, 1 дюйм – 2,54 см) /

Fig. 1. Fragment from the “Map of the distribution of earthquakes in Russia with border areas” according to [Mushketov, Orlov, 1893] (1 verst – 1.0668 km, 1 inch – 2.54 cm)

Сведения о землетрясениях, представленных в [Мушкетов, Орлов, 1893], были собраны А.П. Орловым по 1880 г., дополнены и обобщены И.В. Мушкетовым по 1890 г. Согласно этим данным, на территории Северного Кавказа и Предкавказья наиболее сильные землетрясения были отмечены в следующих районах (в скобках указан год): регион Кавказских Минеральных Вод и, наиболее часто, в районе Пятигорска (1772, первое упоминание; 1784; 1821; 1839; 1844; 1872; 1874); в пределах Северной Осетии, в районах Садонского ущелья (1854) и Владикавказа (1873); в пределах Дагестана, в районах Моздока (1785), Петровска (1863), Дербента (1847), и, наиболее разрушительное, Кизляра (Дагестанское II, 1830). Несмотря на появившиеся различные каталоги, содержащие сведения об исторических и инструментальных землетрясениях (по данным Т.Б. Яновской [2014], история отечественной инструментальной сейсмологии начинается на рубеже 19-го и 20-го веков) Кавказа, примером которого может служить каталог А.А. Годзикинской (приведены сведения о исторических и инструментальных землетрясениях с $M \geq 4$ ($K \geq 11$) этого региона) каталог [Мушкетов, Орлов, 1893] представляет собой ценный источник

первичной информации о землетрясениях этого региона. Данные по сейсмичности Северного Кавказа обобщались в [Ананьин, 1977; Ulomov et al., 2007]. Эпицентры наиболее сильных исторических и инструментальных землетрясений по [Tibaldi et al., 2020] вынесены на карту рельефа Большого Кавказа (рис. 2).

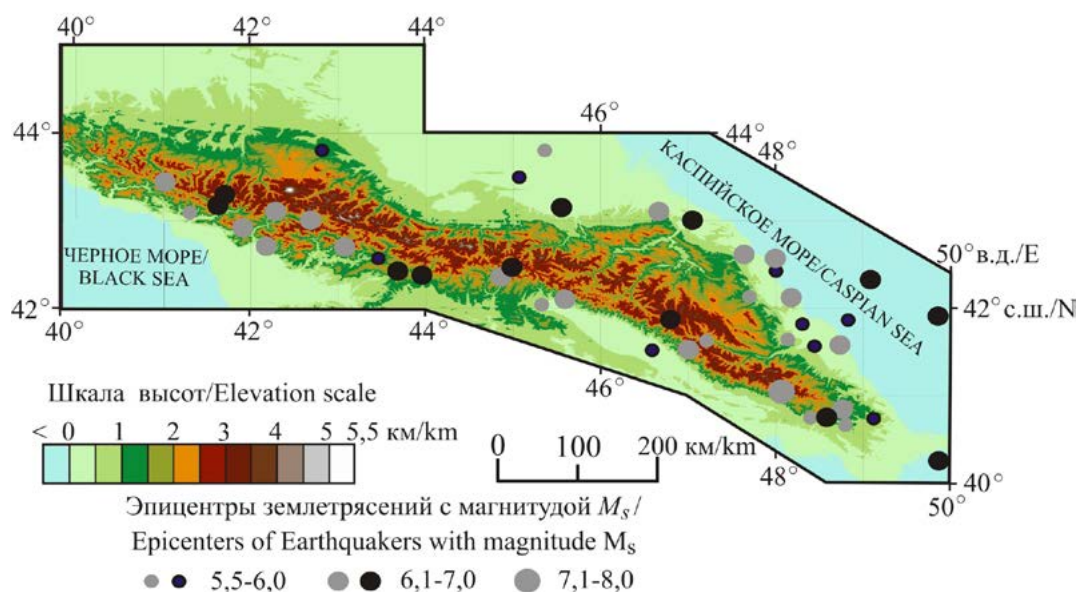


Рис. 2. Эпицентры наибольших исторических (до 1900 г., серые) и инструментальных (после 1900 г., черные) землетрясений по [Tibaldi et al., 2020] на карте рельефа Большого Кавказа /

Fig. 2. Epicenters of the largest historical (before 1900, gray) and instrumental (after 1900, black) earthquakes according to [Tibaldi et al., 2020] on the relief map of the Greater Caucasus

История инструментальных сейсмических наблюдений на Северном Кавказе изложена в [Габсатарова и др., 2008], где выделены и описаны семь периодов наблюдений, инструментальное и методологическое обеспечение которых находило отражение в региональных каталогах в значениях представительных магнитуд и наклона графика повторяемости регистрируемых землетрясений. Отмечено, что за вековой период сейсмических наблюдений уровень представительных магнитуд M на большей части территории Северного Кавказа доведен с 5 до 2. В 2015 г. сейсмический мониторинг Северного Кавказа и прилегающих территорий осуществлялся на 59 сейсмостанциях сети ФИЦ ЕГС РАН. Все сейсмостанции были оснащены цифровым оборудованием, подключены к сети Интернет и передавали информацию в центры обработки в режиме, близком к реальному времени, эпицентры наиболее значимых землетрясений.

Современная геодинамика Кавказа наиболее отчетливо проявляется в материалах GPS-наблюдений, что показано в материалах [Лукк, Шевченко, 2019]. В этой работе проанализированы данные сейсмических наблюдений по примерно 230 пунктам, расположенным на территории Северного Кавказа (Дагестан, Северная Осетия, Ставропольский и Краснодарский края) и сопредельных государств (Азербайджан, Армения, Грузия и частично Турция) с результатами GPS-наблюдений.

Целью настоящей работы является анализ возможностей мониторинга современных геодинамических процессов и сейсмичности существующей сетью станций и лабораторий Северного Кавказа и выработка рекомендаций по возможности их использования для комплексной интерпретации при решении специальных задач.

Материалы и методы исследований

Методы и методика работы заключались в обзоре и анализе систем мониторинга современных геодинамических процессов и сейсмичности Северного Кавказа и, на этой основе, поиске и обоснованию новых направлений их эффективного использования.

Одной из эффективных методик и технологий изучения современных геодинамических процессов является мониторинг движения литосферных плит и отдельных блоков земной коры по данным GPS-наблюдений, широко применяющийся начиная с 90-х гг. XX века в различных регионах Мира [Gahalaut et al., 2017; Reilinger et al., 2006; Thatcher, 2003]. Особенно эффективно применение этих технологий при изучении коллизионных зон Земли, одной из которых согласно В.Г. Трифонову [Trifonov, 2016] является Аравийско-Кавказский сегмент Альпийско-Гималайского орогенического пояса, северным флангом которого является Большой Кавказ. Согласно данным GPS-измерений [McClusky et al., 2000], Кавказский сегмент имеет тенденцию движения в северо-восточном направлении, преимущественно ортогональном простиранию основных структур Большого Кавказа со скоростью 10 мм/год. Расположенный западнее Анатолийский блок движется в юго-западном направлении со скоростью 25 мм/год, а расположенный восточнее Иранский блок – в юго-восточном направлении со скоростью 10 мм/год, что обусловлено движением в северо-северо-западном направлении Аравийской плиты со скоростью 18 мм/год (в Евразийской системе координат ITRF).

Сеть GPS-станций на Северном Кавказе начала организовываться в 1990-х гг. [Milyukov et al., 2015]. Станция GPS «Зеленчукская» (Карачаево-Черкесия) была создана на территории Зеленчукской радиоастрономической обсерватории Института прикладной астрономии (ИПА) РАН, расположенной на высоте 1166 м над уровнем моря. В 1997 г. она включена в сеть опорных станций международной службы IGS (International GNSS Service) с кодом ZECK и в реализацию международной земной системы отсчета ITRF2008 (International Terrestrial Reference System). В 2005–2008 гг. ГАИШ МГУ создал три новых постоянных станции GPS/ГЛОНАСС наблюдений, в их числе: «Терскол» (TRSK), расположенную в Приэльбрусье (Кабардино-Балкария) на территории Терскольской международной обсерватории на высоте 3100 м; «Кисловодск» (KISL) на территории Горной солнечной станции Пулковской обсерватории РАН на горе Шатджатмаз (Карачаево-Черкесия) на высоте 694 м; «Владикавказ» (VLKK), организованную совместно с ВНИЦ РАН и Геофизическим институтом ВНИЦ РАН, на крыше здания которого была установлена антенна этой станции (высота над уровнем моря 696 м). Первые две станции, «Терскол» (TRSK) и «Кисловодск» (KISL), были оснащены антеннами Topcon CR-G3 Choke Ring и приемниками JAVAD Legacy E L1/L2 GPS/GLONASS, а третья станция, «Владикавказ» (VLKK), была оснащена антенной Javad MarAnt+ и приемником JAVAD Legacy E L1/L2 GPS/GLONASS. С 2010 г. на Северном Кавказе развивается сеть станций GPS/GLONASS Геофизическая служба (ГС) РАН (4 станции). Точность определения координат станций GPS/ГЛОНАСС по данным обработки наблюдений оценивается в пределах 1–3 мм за сутки, что соответствует точности определения координат опорных станций сети IGS.

На схему рисунка 3 вынесены пункты GPS-наблюдений и результаты измерений за 1991–1997 гг. из работы [Лукк, Шевченко, 2019]. Оценка скоростей и на-

правлений движений пунктов GPS-наблюдений была выполнена в местной системе координат относительно опорной геодезической станции «Зеленчук» (ZELB), которая расположена в пределах относительно стабильной Лабино-Малкинской зоны. Пункты GPS NINO и NICH, расположенные на территории Грузии, имеют векторы скоростей субмеридионального направления, ортогонального к простиранию основных структур Большого Кавказа, а векторы скоростей пунктов GPS, расположенных в пределах Северного Кавказа, разнонаправлены относительно структур кристаллического фундамента. Так, вектор скорости пункта GPS DUBK, расположенного в контурах Терского блока кристаллического фундамента, имеет юго-восточное направление, а рядом расположенного пункта ZURA, попадающего, вероятно, в зону влияния внутриблокового разлома – запад-северо-западное, близкое к направлению простирания этого разлома. В пределах Центрального сектора Большого Кавказа, вектор скорости пункта GPS KRES (модуль вектора 3,53 мм/год относительно станции ZELB), расположенного в контурах Верхнетерского блока кристаллического фундамента, имеет северо-западное направление, а пунктов GPS BEUG, SHAT, ULKA, BALK, MATS, расположенных в контурах Эльбурсского блока – преимущественно юго-западное. Отметим, что гипоцентры землетрясений в пределах Северного Кавказа локализуются обычно в консолидированной земной коре либо в верхней мантии.

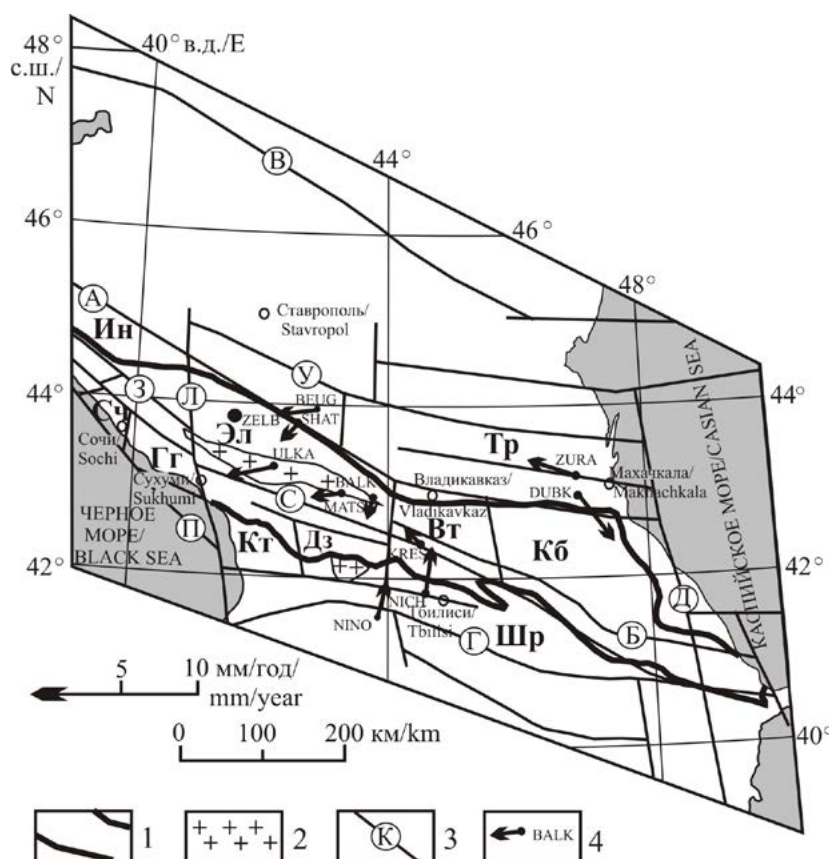


Рис. 3. Пункты GPS-наблюдений и направлений современных тектонических движений Северного Кавказа по [Лукк, Шевченко, 2019] на схеме тектонического строения кристаллического фундамента Большого Кавказа и прилегающих областей по [Стогний, Стогний, 2017], с упрощением: 1 – контур мегаантиклинория Большого Кавказа по

[Геологическая..., 1978]; 2 – выходы протерозойских метаморфических пород и палеозойских гранитов Центрального сегмента и Дзирульского массива; 3 – межблоковые разломы: А – Азово-Каспийский, В – Северо-Скифский, Г – Аджаро-Мингечаурский, Д – Дербент-Ленкоранский, 3 – Западно-Кавказский, Л – Лаба-Батумский, У – Уруп-Терский; П – Причерноморский, С – Сването-Алазанский, Б – Бежитинский. 4 – векторы скоростей горизонтальных смещений геодезических станций GPS по данным измерений за 1991–1997 гг. [Shevchenko et al., 1999] относительно опорной геодезической станции ZELB и их кодовые названия. Блоки: Сч – Сочинский, Гг – Гагринский, Дз – Дзирульский, Вт – Верхнетерский, Ин – Индолокубанский, Кб – Кубачинский, Тр – Терский, Кт – Кутаисский, Шр – Ширакский, Эл – Эльбрусский /

Fig. 3. GPS observation points and directions of modern tectonic movements of the North Caucasus according to [Lukk, Shevchenko, 2019] on the scheme of the tectonic structure of the Greater Caucasus crystalline basement and adjacent areas according to [Stogny, Stogny, 2017], with simplification: 1 – outline of the Greater Caucasus megaanticlinorium after [Geological..., 1978]; 2 – outcrops of Proterozoic metamorphic rocks and Paleozoic granites of the Central segment and the Dzirul massif;

3 – interblock faults: A – Azov-Caspian, B – North Scythian, D – Adzhar-Mingachevir, D – Derbent-Lenkoran, H – West Caucasian, L – Laba-Batum, U – Urup-Tersky; P – Black Sea, S – Svaneto-Alazansky, B – Bezhitsky; 4 – velocity vectors of horizontal displacements of GPS geodetic stations according to measurement data for 1991–1997 [Shevchenko et al., 1999] relative to the reference geodetic station ZELB and their code names. Blocks: Sch – Sochinsky, Gg – Gagrynsky, Dz – Dzirullsky, Vt – Verkhnetersky, In – Indolokubansky, Kb – Kubachinsky, Tr – Tersky, Kt – Kutaissky, Shr – Shiraksky, El – Elbrusky

Данные о землетрясениях с магнитудой $m_b \geq 3$ исследуемого региона содержатся в каталоге Международного сейсмологического центра (ISC bulletin). Сведения о землетрясениях для каталога ISC дают национальные сети сейсмических станций, примером которых может служить сеть сейсмических станций Индии [Srijayanthi et al., 2020], содержащая 115 сейсмических станций Национального центра сейсмологии (NCS). Сейсмический мониторинг для сильных землетрясений Индии (с магнитудой $M > 6,0$) дополнялся исследованиями, связанными с динамикой очага землетрясения и параметрами разрыва по наблюдениям за смещением на участках близко расположенных GPS-пунктов.

Согласно В.И. Бурмину [Burmin, 2018], эффективность современной Кавказской сети сейсмологических наблюдений (всего 258 станций) оценивается следующим образом: в центре сети ошибка в определении координат эпицентров землетрясений по широте и долготе не превышает 0,4 км, глубин очагов – 1,0 км, а на периферии сети на всей территории Кавказа соответственно 1,0 км для координат эпицентра и 10 км при определении глубин очага землетрясения. Сеть сейсмических станций Северного Кавказа ФИЦ ЕГС РАН в настоящее время содержит около 70 сейсмостанций, в их числе: Дагестанского филиала – 7, Северо-Осетинского – 17, Кавминводской группы – 18. В районе Большого Сочи по [Маловичко, Габсатарова, 2012] магнитудная представительность сети сейсмических станций составляет не менее 1 балла. По результатам изучения ночных и дневных уровней микросейсмического шума в различные времена года на сейсмических станциях западной зоны Северного Кавказа [Маловичко и др., 2020], на картах представительных значений K_{Pmin} выделяются две области наибольшей чувствительности сети: Анапская, с уровнем $K_{Pmin} = 6,0$ днем и $K_{Pmin} = 5,5$ ночью, и Сочинско-Краснополянская, с уровнем $K_{Pmin} = 5,5$ днем и $K_{Pmin} = 5,0–5,5$ ночью.

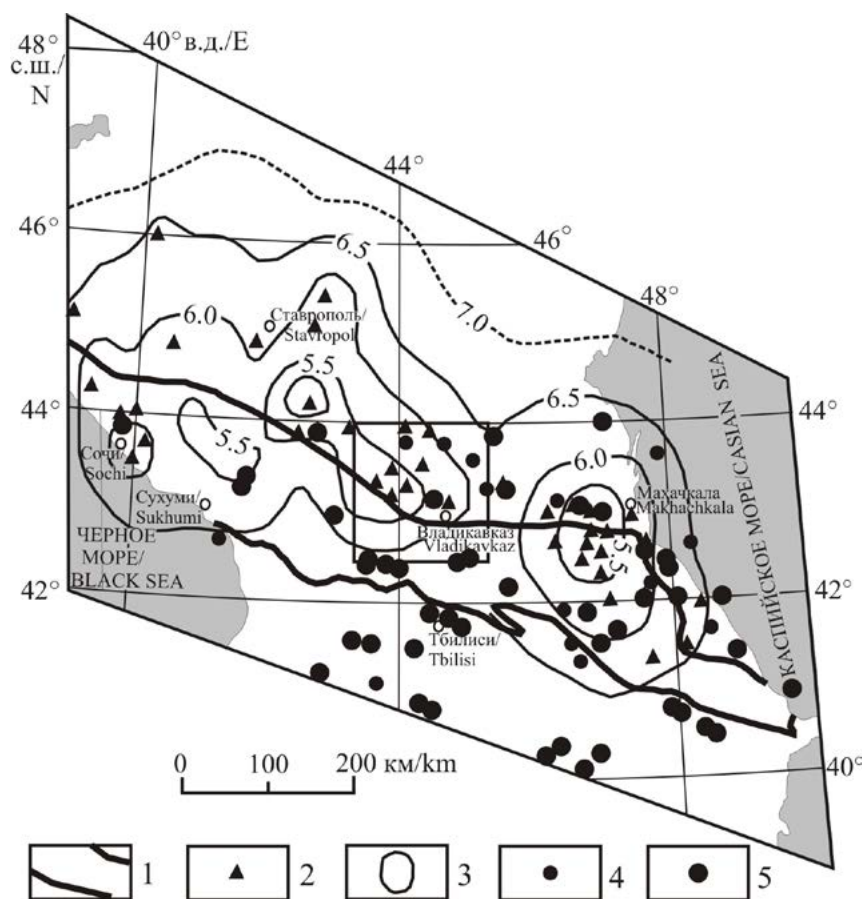


Рис. 4. Схема расположения сейсмических станций Северного Кавказа и возможности локации сейсмических событий как минимум тремя станциями в единицах K_{pmin} по [Габсатарова и др., 2021] с эпицентрами землетрясений (исторических и инструментальных) магнитудой $M \geq 5,5$ по (электронный ресурс: Каталог землетрясений Кавказа / А.А. Годзиковская // <http://zeus.wdcb.ru/wdcb/sep/caucasus/catrudat.html>), дополненные по «Каталог землетрясений ISC» за 2015–2021 гг.: 1 – контур мегаантиклинория Большого Кавказа по [Геологическая..., 1978]; 2 – сейсмические станции; 3 – изолинии возможности локации сейсмических событий как минимум тремя станциями в единицах K_{pmin} ; 4, 5 – эпицентры землетрясений с магнитудой: 4 – $M = 5,5-6,0$, 5 – $M > 6,0$. Прямоугольник – контур рис. 5 /

Fig. 4. Scheme of the location of seismic stations in the North Caucasus and the possibility of locating seismic events by at least three stations in units of K_{pmin} according to [Gabsatarova et al., 2021] with epicenters of earthquakes (historical and instrumental) with a magnitude $M \geq 5.5$ according to (Web resource: Catalog of earthquakes of Caucasus/ A.A. Godzikovskaya // <http://zeus.wdcb.ru/wdcb/sep/caucasus/catrudat.html>), supplemented according to the “Catalog of earthquakes ISC” for 2015–2021: 1 – outline of the Greater Caucasus megaanticlinorium after [Geologicheskaya..., 1978]; 2 – seismic stations; 3 – isolines of the possibility of locating seismic events by at least three stations in units of K_{pmin} ; 4, 5 – epicenters of earthquakes with magnitude: 4 – $M = 5.5-6.0$, 5 – $M > 6.0$. Rectangle – the contour of the fig. 5

Основные сейсмостанции Северного Кавказа сети ФИЦ ЕГС РАН, а также возможности локации сейсмических событий как минимум тремя станциями в единицах K_{pmin} по состоянию на 2015 г. [Габсатарова и др., 2021] вынесены на схему рис. 4. Согласно этим данным, возможность локации сейсмических событий с $K_{pmin} \leq 5,5$ одновременно тремя станциями достигается в восточной части Большого Кавказа (Дагестан), в центральном секторе Большого Кавказа и Предкавказья, и в восточной части Северо-Западного Кавказа.

Результаты исследований и их обсуждение

За последние десятилетия в пределах Большого Кавказа и близлежащих территорий получен довольно представительный материал по современным геодинамическим процессам [Leonov et al., 2001; Рогожин и др., 2019; McClusky et al., 2000; Reilinger et al., 2006; Tan, Taymaz, 2006; Tibaldi et al., 2018, 2020]. Данные систематических GPS-наблюдений на Северном Кавказе наиболее полно обобщены в работах [Лукк, Шевченко, 2019; Milyukov et al., 2015; Shevchenko et al., 1999; Milyukov et al., 2014; Prilepin et al., 1997].

Из наиболее общих закономерностей, отмеченных в [Milyukov et al., 2015] по данным наблюдений на Северо-Кавказской геодинамической сети (СКГС), является смещение структур Северного Кавказа в северо-восточном направлении со скоростью 26–28 мм/год в системе отсчета ITRF2008, при общем сжатии региона со скоростью 1–2 мм/год относительно неподвижной Евразии. При сопоставлении направлений векторов скорости движений пунктов GPS-наблюдений Северного Кавказа относительно опорной геодезической станции «Зеленчук» (ZELB) по данным [Лукк, Шевченко, 2019] со схемой блокового строения кристаллического фундамента этого региона выше было отмечено, что пункты GPS-наблюдений с векторами, значительно различающимися по направлениям, обычно располагаются в пределах разных блоков кристаллического фундамента. Это подтверждает сделанные нами ранее выводы по Северо-Западному Кавказу [Стогний, Стогний, 2019] при сопоставлении результатов GPS-наблюдений по десяти пунктам системы СГП АО «Южморгеология» [Бабешко и др., 2016; Величко и др., 2016] со схемой блокового строения кристаллического фундамента. По этим данным вся система GPS-пунктов имеет общий устойчивый тренд скорости в направлении северо-восток относительно станции «Зеленчукская» (ZECK). Наибольшие скорости зарегистрированы на станциях «Анапа» ($5,15 \pm 0,3$ мм/год) и «Сочи» ($3,73 \pm 0,1$ мм/год), расположенных в контурах Анапского и Сочинского наиболее жестких и высокоплотных сейсмоген-

ных блоков консолидированной коры, контролирующих одноименные сейсмические районы. При этом, вектор скорости станции «Анапа» (азимут $+9,61^\circ$) примерно ортогонален Западнокавказскому межплитному разлому, отражая тенденцию «вдавливания» Анапского блока в фундамент Скифской плиты, а вектор скорости станции «Сочи» (азимут $-16,20^\circ$) субпараллелен Западнокавказскому разлому.

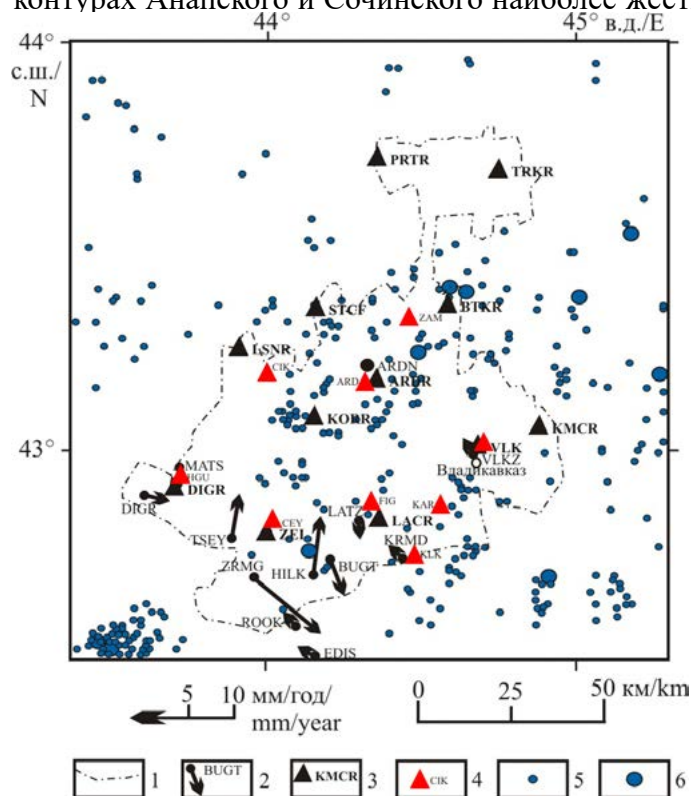


Рис. 5. Сейсмические станции СОФ ФИЦ ЕГС РАН по [Саятина и др., 2019], сейсмические станции ГФИ ВНИЦ РАН [Заалишвили и др., 2011а], эпицентры землетрясений по данным наблюдений за период с 1 января по 31 октября 2021 г. (фонды ФИЦ

ЕГС РАН) и пункты GPS-наблюдений и направлений современных тектонических движений по измерениям 2010–2013 гг. [Лукк, Шевченко, 2019] РСО-А и сопредельных территорий: 1 – граница РСО-А; 2 – векторы скоростей горизонтальных смещений геодезических станций GPS и их кодовые названия относительно опорной геодезической станции ARDN (пункты GPS VLKZ, LATZ по данным [Milyukov et al., 2015]); 3 – сейсмические станции и их кодовые названия; 4, 5 – эпицентры землетрясений с магнитудой: 4 – $M \leq 2,5$, 5 – $M > 2,5$ /

Fig. 5. Seismic stations of the Siberian Branch of the FRC EGS RAS according to [Sayapina et al., 2019], seismic stations of the Geophysical institute of Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences earthquake epicenters according to observational data for the period from January 1 to October 31, 2021 (FRC EGS RAS funds) and GPS observation points and directions of modern tectonic movements according to measurements 2010–2013 [Lukk, Shevchenko, 2019] RNO-A and adjacent territories: 1 - RNO-A boundary; 2 - velocity vectors of horizontal displacements of GPS geodetic stations and their code names relative to the reference geodetic station ARDN (GPS VLKZ, LATZ points according to [Milyukov et al., 2015]); 3 - seismic stations and their code names; 4, 5 - earthquake epicenters with magnitude: 4 – $M \leq 2.5$, 5 – $M > 2.5$

На схему рисунка 5 расположения сейсмических станций СОФ ФИЦ ЕГС РАН и ГФИ ВНИЦ РАН вынесены пункты GPS-наблюдений и их векторы скоростей в местной системе координат относительно станции Ардон (ARDN). Векторы скоростей пунктов GPS-наблюдений EDIS и ROOK (скорости соответственно 3,94 и 0,93 мм/год), расположенные на южном склоне центрального сектора Большого Кавказа, имеют северо-западное направление. Такое же северо-западное направление при небольшой скорости имеют пункты GPS-наблюдений VLKZ и KRMD, а пункт LATZ, расположенный северо-западнее от последнего, имеет южное направление вектора скорости (0,43 мм/год). Векторы скоростей пунктов GPS-наблюдений ZRMG (8,97 мм/год) и BUGT имеют юго-восточное направление, пунктов HILK и TSEY – север-северо-восточное, пункта MATS – юг-юго-западное, а пункта DIGR (2,42 мм/год) – восток-юго-восточное. По данным интерпретации результатов GPS-наблюдений в местной локальной системе координат [Лукк, Шевченко, 2019], в центральном секторе Большого Кавказа и, в частности, на территории РСО-Алания происходит увеличение ширины складчато-надвигового сооружения при одновременном существовании напряжений субгоризонтального сжатия, ориентированного вкрест простирания сооружения, что связывается с увеличением объема слоистых толщ складчато-надвигового сооружения.

Отмеченные нами некоторые связи направлений векторов перемещения GPS-пунктов с проекциями блоков кристаллического фундамента, в пределах которых они расположены, позволяют сформулировать в качестве одной из важных задач поиск связи глубинной тектоники и геодинамики с современными локальными движениями. Такая задача, по-видимому, может быть решена при постановке и проведении специализированных исследований, при которых расположение временных GPS-пунктов при повышенной плотности их сети увязывалось бы с особенностями глубинной структуры и покровно-поверхностных комплексов определенных ключевых участков Северного Кавказа.

По опыту исследований в Крымско-Черноморском регионе [Пустовитенко и др., 2014], результаты многолетнего сейсмического и геодинамического мониторинга могут служить для комплексного анализа текущей сейсмической обстановки и прогноза ее развития, а также для поиска различных предвестниковых явлений и оценки их эффективности для прогноза сильных землетрясений. В этом плане перспективной является осетинская часть центрального сектора Большого Кавказа,

где ГАИШ МГУ совместно с рядом организаций РАН создали спутниково-геодезическую сеть, состоящую из 27 пунктов для проведения периодически повторных GPS-измерений и станцию непрерывных GPS-наблюдений [Рогожин и др., 2019].

На Северном Кавказе одним из наиболее сейсмоопасных для населения является столица Северной Осетии – г. Владикавказ [Zaalishvili, Rogozhin, 2011; Заалишвили и др., 2011a]. Это обусловлено тем, что южная граница города находится всего лишь в нескольких километрах от Владикавказского сейсмогенного разлома. Хотя инструментальными наблюдениями в этом разломе зарегистрированы землетрясения с магнитудами до пяти, однако в действительности его потенциальные возможности гораздо больше. Согласно выполненным в детальном сейсмотектоническом исследовании с применением тренчинг метода установлено, что этот разлом породил в прошлом землетрясения с магнитудами около семи [Рогожин и др., 2011; Zaalishvili, Rogozhin, 2011]. А так как разлом и в настоящее время является сейсмоактивным, то и теперь велика вероятность порождения им сейсмических катастроф.

С учетом изложенных обстоятельств: расположение г. Владикавказа в опасной близости от сейсмогенного разлома и возможное появление в этом разломе зоны сейсмического затишья, явились основанием для создания Владикавказского прогнозного геодинамического полигона. Основными элементами подобных систем являются деформационно-геодезические прогнозные профили, ортогонально пересекающие сейсмогенный разлом [Певнев, 2003, 2020; Pevnev, 2021].

Геодезическая деформационная сеть профиля «Терек» Владикавказского прогнозного полигона представлена на рисунке 6 [Заалишвили и др., 2011b; Певнев, Заалишвили, 2014; Певнев и др., 2014]. В качестве основы деформационной сети основного

ряда взяты девять уже существующих пунктов GPS (включая и постоянно действующий пункт во Владикавказе), расположенные вдоль шоссеной дороги. Все они являются пунктами сгущения на трассе уже существующих пунктов.



Рис. 6. Векторы скоростей горизонтальных движений пунктов Владикавказского геодинамического прогнозного полигона в системе ITRF2008 /

Fig. 6. Velocity vectors of horizontal movements of the points of the Vladikavkaz geodynamic forecast polygon in the ITRF2008 system

Такое сгущение пунктов необходимо по следующим соображениям. При подготовке оча-

га землетрясения максимальные упругие смещения испытывают участки земной поверхности, примыкающие к сейсмогенному разлому и поэтому с целью более достоверного определения вида и величины упругого деформирования на этих участках расстояния между геодезическими пунктами должны быть сравнительно небольшими. Так как ширина зоны максимальных упругих смещений (в обе стороны от разлома) составляет примерно 10–15 км, то с целью уверенного определения вида и параметров сейсмогенной упругой кривой можно считать достаточным располагать геодезические пункты примерно через 1 км на первых 5–7 км в обе стороны от разлома. Можно полагать, что данные о смещениях примерно 12 пунктов позволят установить действительный вид сейсмогенной кривой (деформация упругого изгиба).

На рис. 6 представлены результаты измерений за период 2014–2016 гг. в системе ITRF2008 [Заалишвили и др., 2016; Заалишвили и др., 2018]. Скорости и направления горизонтальных движений не изменяются при пересечении зоны разлома. Аналогичные результаты получены за период 2015–2016 гг. в работе [Рогожин, Милюков, 2016]. В соответствии с северо-восточной ориентировкой направления смещений пунктов и близширотным простираанием дизъюнктивной зоны следует предполагать наличие левосторонних сдвиговых подвижек по ветвям активного разлома. Однако свидетельств активизации движений в зоне разлома в указанный период не наблюдалось. Несомненно, что только подобные плотные системы геодезического мониторинга могут ответить на вопрос готовится или нет в конкретном разломе очаг землетрясения [Певнев, 2003, 2020]. При этом прогноз, несомненно, должен подкрепляться данными сейсмического мониторинга.

На территории РСО-Алания развернута сеть из 12 цифровых сейсмических станций североосетинского филиала ФИЦ ЕГС РАН [Саяпина и др., 2019], две из которых (VLK и DIGR) широкополосные, а остальные короткопериодные. На сейсмических станциях «Владикавказ» (VLK), «Лац» (LACR), «Ардон» (ARDR) и «Притеречная» (PRTR) установлена аппаратура непрерывных GPS-наблюдений горизонтальных перемещений.

Республиканская сейсмическая сеть наблюдений Геофизического института ВНИЦ РАН содержит 9 станций (рис. 5), а также 6 сейсмических станций, расположенных на территории г. Владикавказ в районах, отличающихся инженерно-геологическими условиями. Эта сеть в 2003 г. была преобразована в сеть комплексных наблюдений «Кармадонский параметрический полигон» с организацией системы сейсмических, геодинамических и гравиметрических наблюдений. В 2006 г. сейсмическая сеть института была модернизирована с заменой устаревших к этому времени цифровых регистраторов сейсмических сигналов (РСС) «Альфа-Геон» на более современные РСС «Дельта-Геон» [Заалишвили и др., 2017].

Учитывая довольно высокую плотность сейсмической и геодинамической сетей, осетинскую часть центрального сегмента Большого Кавказа можно считать приоритетным объектом исследований, на котором могут решаться задачи поиска связей геодинамических особенностей и сейсмического режима. Одним из основных проблемных вопросов при этом является поиск связи глубинных геодинамических процессов на уровне отдельных блоков кристаллического фундамента и неотектонического строения верхних горизонтов разрезов с особенностями распределения векторов скорости пунктов GPS-измерений и сейсмическим режимом данной территории на основе моделей, учитывающих реологические свойства структур-

но-вещественных комплексов и поля тектонических напряжений данного региона. При решении этой задачи необходимо максимально учитывать опыт структурно-тектонических и неотектонических исследований центрального сектора Большого Кавказа и прилегающих территорий [Leonov et al., 2001; Rogozhin et al., 2015; Свалова, 2021; Сим, Гордеев, 2022]. Важным является также вопрос поиска связи опасных геологических процессов высокогорных территорий, в их числе селей и оползней, с сейсмическим режимом, геодинамическими и реологическими особенностями разрезом и их прогноза на основе инструментальных измерений [Заалишвили и др., 2017; Чотчаев и др., 2020].

Выводы

Предварительные данные по сопоставлению векторов скорости перемещения GPS-пунктов со схемой блокового строения кристаллического фундамента Большого Кавказа и сопредельных территорий показывают, что в пределах проекций этих блоков направления векторов скорости довольно выдержаны. Это позволяет в качестве актуальной сформулировать задачу поиска взаимосвязи между глубинными источниками тектонических напряжений и их возможной связи с приповерхностной геодинамикой и сейсмическим режимом, которые могли бы стать основой геоэкологического районирования. Данная задача должна решаться на основе специализированных исследований, основанных на мониторинге современных геодинамических процессов и сейсмичности. В качестве объекта исследования может служить северо-осетинская часть центрального сектора Большого Кавказа, обеспеченная наиболее плотной сетью станций GPS и сейсмического мониторинга.

Литература

1. Ананьин И.В. Сейсмичность Северного Кавказа. – М.: Наука, 1977. – 148 с.
2. Бабешко В.А., Юбко В.М., Глазырин Е.А., Шестопалов В.Л. Характер движений поверхности земной коры по данным GPS-измерений в районе Азово-Черноморского побережья Российской Федерации. // Наука юга России (Вестник Южного Научного Центра). – 2016. – Т. 12. №4. – С. 33–40.
3. Величко С.В., Глазырин Е.А., Шереметьев В.М., Шестопалов В.Л. Мониторинг геодинамической активности Туапсинско-Сочинской сейсмоактивной зоны по данным GPS-наблюдений. // Инженерная геология Северо-Западного Кавказа и Предкавказья: современное состояние и основные задачи. Сб. науч. трудов. / Под ред. Т.В. Любимовой, Н.А. Бондаренко, Е.А. Волошко. – Краснодар: Просвещение-Юг, 2016. – С. 41–47.
4. Габсатарова И.П., Маловичко А.А., Старовойт О.Е. История инструментальных сейсмических наблюдений на Северном Кавказе (очерк). // Геофизический журнал. – 2008. – Т. 30. №5. – С. 50–72.
5. Габсатарова И.П., Королецки Л.Н., Иванова Л.Е., Саяпина А.А., Багаева С.С., Адилов З.М., Асманов О.А. Сейсмичность Северного Кавказа в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 69–83.
6. Геологическая карта Кавказа. Масштаб 1:500 000. / Гл. редактор Д.В. Наливкин. – М.: НПО «Аэрогеология». 1978.
7. Заалишвили В.Б., Дзеранов Б.В., Габараев А.Ф. Оценка сейсмической опасности территории и построение вероятностных карт. // Геология и геофизика Юга России. – 2011а. – №1. – С. 48–59.
8. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Кануков А.С. Развитие сетей GPS/ГЛОНАСС наблюдений на территории Республики Северная Осетия-Алания. // Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 10-летию со дня основания КНИИ

РАН «Наука и образование в Чеченской республике: состояние и перспективы развития», 7 апреля 2011 г., КНИИ РАН. – 2011б. – С. 325–327.

9. Заалишвили В.Б., Гусева Т.В., Розенберг Н.К., Мельков Д.А. Вопросы практической реализации геодезического мониторинга на примере Владикавказского геодинамического прогнозного полигона. // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – №3. – С. 58–64.

10. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Кануков А.С. Инструментальный анализ опасных природно-техногенных процессов на территории Северной Осетии. // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том VII. Часть 2. / Под ред. И.А. Керимова. – М.: ИИЕТ РАН, 2017. – С. 89–100.

11. Заалишвили В.Б., Певнев А.К., Кануков А.С. Геодезический прогнозный мониторинг на территории Республики Северная Осетия-Алания. // Труды института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2018. – №4(75). – С. 7–11.

12. Лукк А.А., Шевченко В.И. Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа. // Физика Земли. – 2019. – №4. – С. 99–123.

13. Маловичко А.А., Габсатарова И.П. Сейсмическая опасность и сейсмический мониторинг Причерноморья Российской Федерации. // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества (ЧЭС). – 2012. – №1. – С. 98–105.

14. Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Дягилев Р.А., Мехрюшев Д.Ю., Зверева А.С. Оценка регистрационных возможностей сейсмической сети в западной части Северного Кавказа через геометрию сети и локальный уровень микросейсмических шумов. // Сейсмические приборы. – 2020. – Т. 56. №3. – С. 35–60. <https://doi.org/10.21455/si2020.3-3>

15. Мушкетов И.В., Орлов А.П. Каталог землетрясений Российской империи: Записки русского географического общества по общей географии. Том XXXVI. / Под редакцией И.В. Мушкетова. – СПб.: Типография Императорской академии наук, 1893. – 580 с.

16. Певнев А.К. Пути к практическому прогнозу землетрясений. – М.: ГЕОС, 2003. – 153 с.

17. Певнев А.К., Заалишвили В.Б. О причинах коровой сейсмичности и возможности прогноза землетрясений методами решения прямых задач. // Геология и геофизика Юга России. – 2014. – №4. Т. 2. – С. 91–98.

18. Певнев А.К., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А. О модернизации геодезических исследований на Владикавказском геодинамическом прогножном полигоне. // Геология и геофизика Юга России. – 2014. – №4. Т. 2. – С. 84–90.

19. Певнев А.К. Чрез тернии – к прогнозу землетрясений. // Геология и Геофизика Юга России. – 2020. – №10. Т.2. – С. 82–94. DOI: 10.46698/VNC.2020.25.51.006

20. Пустовитенко Б.Г., Лущик А.В., Боборыкина О.В., Кульчицкий В.Е., Можжерина А.В., Насонкин В.А., Панков Ф.Н., Поречнова Е.И., Пустовитенко А.А., Тихоненков Э.П., Швырло Н.И. Мониторинг сейсмических процессов в Крымско-Черноморском регионе. – Севастополь: НПП «ЭКОСИ Гидрофизика», 2014. – 264 с.

21. Рогожин Е.А., Иогансон Л.И., Завьялов А.Д. и др. Потенциальные сейсмические очаги и сейсмологические предвестники землетрясений – основа реального сейсмического прогноза. / Отв. ред. А.О. Глико. – М.: ООО «Светоч Плюс», 2011. – 368 с.

22. Рогожин Е.А., Милюков В.К. Спутниковый геодезический мониторинг и сейсмические проявления зоны Владикавказского активного разлома. // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – №4. – С. 102–110.

23. Рогожин Е.А., Милюков В.К., Миронов А.П., Горбатиков А.В., Овсяченко А.Н. Характеристики современных горизонтальных движений в зонах заметных землетрясений начала 21-го века в центральном секторе Большого Кавказа по данным GPS-наблюдений и их связь с глубинным строением земной коры. // Проблемы тектоники континентов и океанов. Материалы LI Тектонического совещания. Т. 2. / Отв. ред. К.Е. Дегтярев. – М.: ГЕОС, 2019. – С. 173–178.

24. Саяпина А.А., Багаева С.С., Горожанцев С.В. Краткая история создания и этапы развития сейсмологической службы в Республике Северная Осетия-Алания (к 80-летию

Э.В. Погоды и 20-летию образования СОФ ФИЦ ЕГС РАН). // Вестник Владикавказского научного центра РАН. – 2019. – Т. 19. № 2. С. 56–64.

25. Свалова В.Б. Сравнительная геодинамика и геотермия Альпийского и Тихоокеанского поясов. Механико-математическое моделирование. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №3. – С. 76–92. DOI: 10.46698/VNC.2021.52.15.007.

26. Сим Л.А., Гордеев Н.А. Сравнение результатов изучения тектонических напряжений Кавказа разными методами // Тектоника и геодинамика земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2022. Материалы ЛПТ Тектонического совещания. Т. 2 / Отв. ред. К.Е. Дегтярев. – М.: ГЕОС, 2022. – С. 175–178.

27. Стогний В.В., Стогний Г.А. Блоковое строение и современные движения поверхности земной коры Северо-Западного Кавказа // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том IX. / Под ред. И.А. Керимова, В.Б. Заалишвили, В.И. Черкашина. – М.: ИИЕТ РАН, 2019. – С. 506–510.

28. Стогний Г.А., Стогний В.В. Сейсмичность Большого Кавказа с позиции блоковой делимости земной коры. // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества (ЧЭС). – 2017. – №2. – С. 86–95.

29. Чотчаев Х. О., Бурдзиева О. Г., Заалишвили В. Б. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №4. – С. 70–100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005.

30. Яновская Т.Б. К истории российской сейсмологии. // Вопросы геофизики. – 2014. – Вып. 47. (Учёные записки СПбГУ, № 447). – С. 32–41.

31. Burmin V.Yu. Evaluation of the effectiveness of the network of seismological observations in the Caucasus. // Seismic instruments. – 2018. – Vol. 54. No. 2. – pp. 24–32. DOI: 10.21455/si2018.2-2.

32. Gahalaut V.K., Yadav Rajeev K., Sreejith K.M., Gahalaut K., Bürgmann R., Agrawal R., Sati S.P. and Kumar A. InSAR and GPS measurements of crustal deformation due to seasonal loading of Tehri reservoir in Garhwal Himalaya, India. // Geophysical Journal International. – 2017. DOI: 10.1093/gji/ggx015

33. Leonov Yu.G., Gushchenko O.I., Kopp M.L., Rastsvetaev L.M. Interrelation of late Cenozoic stresses and deformations in the Caucasian sector of the Alpine belt and in its northern platform framing. // Geotectonics. – 2001. – No. 1. – pp. 36–59.

34. McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C. Ergintav S., Georgiev I., Gurkan O., Hamburger M., Hurst K., Kahle H., Kastens K., Kekelidze G., King R., Kotzev V., Lenk O., Mahmoud S., Mishin A., Nadariya M., Ouzounis A., Paradissis D., Peter Y., Prilepin M., Reilinger R., Sanlı I., Seeger H., Tealeb A., Toksoz M.N., Veis G. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. // Journal of Geophysical Research. – 2000. Vol. 105. – pp. 5695–5719. DOI: 10.1029/1999 JB900351.

35. Milyukov V., Kopaev A., Zharov V., Mironov A., Myasnikov A., Kaufman M., Duev D. Monitoring crustal deformations in the Northern Caucasus using a high precision long base laser strainmeter and the GPS/GLONASS network. // J. Geod. – 2010. – No.49. – pp. 216–223. DOI: 10.1016/j.jog.2009.10.003.

36. Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblov G.M. Estimates of the velocities of modern movements of the North Caucasus from GPS observations. // Geotectonics. – 2015. – No. 3. – pp. 56–65. DOI: 10.31857/S0002-33372019499-123.

37. Pevnev A.K. Substantiation of the main concepts for the deformation model of the crustal earthquake source preparation. // Geology and Geophysics of Russian South. – 2021. – Vol. 11. No.1. – pp. 104–120. DOI: 10.46698/VNC. 2021.53.34.009.

38. Prilepin M., Mishin A., Guseva T., Balassanian S. Preliminary estimates of plate convergence in the Caucasus collision zone from global positioning system measurements. // Geoph. Res. Letters. – 1997. – No.14. – pp. 1815–1818.

39. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliev I., Stepanyan R., Nadariya M., Hahubia G., Mahmoud S., Sakr K., ArRajehi

A., Paradissis D., Al-Aydrus A., Prilepin M., Guseva T., Evren E., Dmitrotsa A., Filikov S.V., Gomez F., Al-Ghazzi R., Gebran Karam. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2006. – Vol. 111. No.5. Is. B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051

40. Rogozhin E.A., Gorbatiykov A.V., Stepanova M.Yu., Ovsyuchenko A.N., Andreeva N.V., Kharazova Yu.V. 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.

41. Shevchenko V.I., Guseva T.V., Lukk A.A., Mishin A.V., Prilepin M.T. et al. Modern geodynamics of the Caucasus (according to the results of GPS measurements and seismic data. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 1999. – No. 9. – pp. 3–18.

42. Srijayanthi G., Ravi Kumar M., Gahalaut V.K. A review of seismological research in India during the past five years (2015–2019). // *Proc. Indian Natn. Sci. Acad.* – 2020. – Vol. 86. No.1. – pp. 531–552. DOI: 10.16943/ptinsa/2020/49794

43. Tan O., Taymaz T. Active tectonics of the Caucasus: Earthquake source mechanisms and rupture histories obtained from inversion of teleseismic body waveforms. / Dilek Y., Pavlides S. (eds.). *Postcollisional tectonics and magmatism in Mediterranean region and Asia: Geological Society of America Special Paper*. – 2006. – Vol. 409. – pp. 531–578. DOI: 10.1130/2006.2409 (25).

44. Thatcher W. GPS constraints on the kinematics of continental deformation. // *International Geology Review*. – 2003. – Vol. 45. – pp. 191–212. DOI: 10.2747/0020-6814.45.3.191.

45. Tibaldi A., Bonali F.L., Russo E., Pasquare Mariotto F.A. Structural development and stress evolution of an arcuate fold-and-thrust system, southwestern Greater Caucasus, Republic of Georgia. // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2018. – Vol. 156(1). – pp. 226–245. DOI: Org/10.1016/j.jseae.2018.01.025.

46. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T., Bonali F.L., Russo E., Kadirov F., Yetirmishli G., Kazimova S. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2020. – Vol. 88. – pp. 104108. DOI: 10.1016/j.jseae.2019.104108.

47. Trifonov V.G. Collision and mountain building. // *Geotectonics*. – 2016. – No. 1. – pp. 3–24.

48. Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Polyakova T.P., Shumilina L.S. On the assessment of seismic hazard in the North Caucasus. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2007. – No. 7. – pp. 31–45.

49. Zaalishvili V.B., Rogozhin E.A. Assessment of Seismic Hazard of Territory on Basis of Modern Methods of Detailed Zoning and Seismic Microzonation. // *The Open Construction and Building Technology Journal*. – 2011. – No.5. – pp. 30–40.

References

1. Ananin I.V. Seismicity of the North Caucasus. Moscow. Nauka. 1977. 148 p. (In Russ.)
2. Babeshko V.A., Yubko V.M., Glazyrin E.A., Shestopalov V.L. The nature of the movements of the surface of the Earth's crust according to GPS-measurements in the region of the Azov-Black Sea coast of the Russian Federation. *Science in the South of Russia*. 2016. Vol. 12. No. 4. pp. 33–40. (In Russ.)
3. Velichko S.V., Glazyrin E.A., Sheremetiev V.M., Shestopalov V.L. Monitoring of geodynamic activity of the Tuapse-Sochi seismically active zone according to GPS-observations. *Engineering geology of the North-Western Caucasus and Ciscaucasia: current state and main tasks. Scientific Proceedings. Krasnodar, Prosveshchenie-Yug*. 2016. pp. 41–47. (In Russ.)
4. Gabsatarova I.P., Malovichko A.A., Starovoit O.E. History of Instrumental Seismic Observations in the North Caucasus (Essay). *Geophysical journal*. 2008. Vol. 30. No. 5. pp. 50–72. (In Russ.)

5. Gabsatarova I.P., Koroletski L.N., Ivanova L.E., Sayapina A.A., Bagaeva S.S., Adilov Z.M., Asmanov O.A. Seismicity of the North Caucasus in 2015. *Earthquakes of Northern Eurasia*. 2021. Issue 24. 2015. pp. 69–83. (In Russ.)
6. Geological map of the Caucasus. Scale 1:500,000. Ed. D.V. Nalivkin. Moscow. NPO Aerogeologiya. 1978. (In Russ.)
7. Zaalishvili V.B., Dzeranov B.V., Gabaraev A.F. Seismic hazard assessment of the territory and construction of probability maps. *Geology and geophysics of Russian South*. 2011. Vol. 1. No.1. pp. 48–59. (In Russ.)
8. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A.S. Development of GPS/GLONASS Observation Networks on the Territory of the Republic of North Ossetia-Alania. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 10th Anniversary of the Foundation of the KNII RAS “Science and education in the Chechen Republic: state and development prospects”*, April 7, 2011, KNII RAS 2011, pp. 325–327. (In Russ.)
9. Zaalishvili V.B., Guseva T.V., Rosenberg N.K., Melkov D.A. Practical implementation of geodetic monitoring the example Vladikavkaz geodynamic looking range. *Geology and geophysics of Russian South*. 2016. Vol. 6. No. 3. pp. 58–64. DOI: 10.23671/VNC.2016.3.20830 (In Russ.)
10. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A.S. Instrumental analysis of dangerous natural-technogenic processes in the territory of North Ossetia. *Modern problems of geology, geophysics and geocology of the North Caucasus*. Vol. VII. Part 2. IHST RAS, 2017. pp. 89–100. (In Russ.)
11. Zaalishvili V.B., Pevnev A.K., Kanukov A.S. Geodetic predictive monitoring on the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. *Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018. No.4 (75). pp. 7-11. (In Russ.)
12. Lukk A.A., Shevchenko V.I. Seismicity, tectonics, and gps geodynamics of the Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2019. No. 4. pp. 99–123. DOI: 10.31857/S0002-33372019499-123 (In Russ.)
13. Malovichko A.A., Gabsatarova I.P. Seismic hazard and seismic monitoring of the Black Sea region of the Russian Federation. *Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation (BSEC)*. 2012. No. 1. pp. 98–105. (In Russ.)
14. Malovichko A.A., Gabsatarova I.P., Dyagilev R.A., Mekhryushev D.Yu., Zvereva A.S. Assessment of the registration capabilities of a seismic network in the western part of the North Caucasus through the geometry of the network and the local level of microseismic noise. *Seismic instruments*. 2020. Vol. 56. No. 3. pp. 35–60. DOI: 10.21455/si2020.3-3 (In Russ.)
15. Mushketov I.V., Orlov A.P. Catalog of earthquakes in the Russian Empire. *Notes of the Russian Geographical Society on General Geography*. Volume XXXVI. Saint Petersburg. Imperial Academy of Sciences. 1893. 580 p. (In Russ.)
16. Pevnev A. K. Ways to the practical forecast of earthquakes. Moscow. GEOS, 2003. 153 p. (in Russ.)
17. Pevnev A.K., Zaalishvili V.B. On the causes of crustal seismicity and the possibility of earthquake prediction by methods of solving direct problems. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2014. No.4. pp. 91-99. (in Russ.)
18. Pevnev A.K., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. On the geodetic studies modernization on the Vladikavkaz geodynamic forecast polygon, *Geology and Geophysics of Russian South*, 2014. No.4. pp. 84 90. (in Russ.)
19. Pevnev A. K. Through difficulties to the earthquake prediction. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2020. Vol. 10(2). pp. 82 94. DOI: 10.46698/VNC.2020.25.51.006 (in Russ.)
20. Pustovitenko B.G., Lushchik A.V., Boborykina O.V., Kulchitsky V.E., Mozhzherina A.V. et al. Monitoring of seismic processes in the Crimean-Black Sea region. Sevastopol, SPC ECOSY Hydrophysics, 2014. 264 p. (In Russ.)
21. Rogozhin E.A., Ioganson L.I., Zavyalov A.D. Potential seismic sources and seismological precursors of earthquakes are the basis of real seismic forecasting, *At. Rep.* ed. A. O. Gliko.

Moscow. Svetoch Plus LLC, 2011. 368 p. (in Russ.)

22. Rogozhin E.A., Milyukov V.K. Satellite geodetic monitoring and seismic manifestations of the Vladikavkaz active fault zone. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2016. No.4. pp. 102-110. DOI: 10.23671/VNC.2016.4.20904 (in Russ.)

23. Rogozhin E.A., Milyukov V.K., Mironov A.P., Gorbatikov A.V., Ovsyuchenko A.N. Characteristics of modern horizontal movements in the zones of noticeable earthquakes of the early 21st century in the central sector of the Greater Caucasus according to GPS observations and their relationship with the deep structure of the Earth's crust. In: *Proceedings of the LI Tectonic Conference Prob. of tect. of cont. and oceans*. Vol. 2. Moscow. GEOS, 2019. pp. 173–178. (In Russ.)

24. Sayapina A.A., Bagaeva S.S., Gorozhantsev S.V. A brief history of the creation and development stages of the seismological service in the Republic of North Ossetia-Alania (to the 80th anniversary of E.V. Pogoda and the 20th anniversary of the formation of the SOF FRC EGS RAS). *Bulletin of the VSC RAS*. 2019. Vol. 19. No. 2. pp. 56–64. (In Russ.)

25. Svalova V.B. Comparative geodynamics and geothermy of the Alpine and Pacific belts. Mechanical-mathematical modeling. *Geology and geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 76–92. DOI: 10.46698/VNC.2021.52.15.007. (In Russ.)

26. Sim L.A., Gordeev N.A. Comparison of the results of studying the tectonic stresses of the Caucasus by different methods. In: *Proceedings of the LIII Tectonic Conference Tect. and Geod. of the Earth's Crust and Mantle*. Vol. 2. Moscow. GEOS, 2022. pp. 175–178. (In Russ.)

27. Stogniy V.V., Stogniy G.A. Block structure and modern movements of the Earth's surface of the North-Western Caucasus. In: *Proc. Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus*. Vol. IX. Moscow. IHST RAS, 2019. pp. 506–510. (In Russ.)

28. Stogniy G.A., Stogniy V.V. Seismicity of the Greater Caucasus from the standpoint of the block divisibility of the Earth's crust. *Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation (BSEC)*. 2017. No. 2. pp. 86–95. (In Russ.)

29. Chotchaev Kh. O., Burdzieva O. G., Zaalishvili V. B. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of high mountain areas. *Geology and geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 70–100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005. (In Russ.)

30. Yanovskaya T.B. On the history of Russian seismology. *Problems of geophysics*. 2014. Issue 47. No. 447. pp. 32–41. (In Russ.)

31. Burmin V.Yu. Evaluation of the effectiveness of the network of seismological observations in the Caucasus. *Seismic instruments*. 2018. Vol. 54. No. 2. pp. 24–32. DOI: 10.21455/si2018.2-2.

32. Gahalaut V.K., Yadav Rajeev K., Sreejith K.M., Gahalaut K., Bürgmann R., Agrawal R., Sati S.P. and Kumar A. InSAR and GPS measurements of crustal deformation due to seasonal loading of Tehri reservoir in Garhwal Himalaya, India. *Geophysical Journal International*. 2017. DOI: 10.1093/gji/ggx015.

33. Leonov Yu.G., Gushchenko O.I., Kopp M.L., Rastsvetaev L.M. Interrelation of late Cenozoic stresses and deformations in the Caucasian sector of the Alpine belt and in its northern platform framing. *Geotectonics*. 2001. No. 1. pp. 36–59.

34. McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S. et al. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*. 2000. Vol. 105. pp. 5695–5719. DOI: 10.1029/1999JB900351.

35. Milyukov V., Kopaev A., Zharov V., Mironov A., Myasnikov A., Kaufman M., Duev D. Monitoring crustal deformations in the Northern Caucasus using a high precision long base laser strainmeter and the GPS/GLONASS network. *J. Geod.* 2010. No.49. pp. 216–223. DOI: 10.1016/j.jog.2009.10.003.

36. Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblov G.M. Estimates of the velocities of modern movements of the North Caucasus from GPS observations. *Geotectonics*. 2015. No. 3. pp. 56–65. DOI: 10.31857/S0002-33372019499-123.

37. Pevnev A.K. Substantiation of the main concepts for the deformation model of the crustal earthquake source preparation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol.11(1). pp.

104 – 120. DOI: 10.46698/VNC.2021.53.34.009.

38. Prilepin M., Mishin A., Guseva T., Balassanian S. Preliminary estimates of plate convergence in the Caucasus collision zone from global positioning system measurements. *Geoph. Res. Letters*. 1997. No.14. pp. 1815–1818.

39. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S. et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2006. Vol. 111. No.5. Issue B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051

40. Rogozhin E.A., Gorbatiykov A.V., Stepanova M.Yu., Ovsyuchenko A.N., Andreeva N.V., Kharazova Yu.V. 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.

41. Shevchenko V.I., Guseva T.V., Lukk A.A., Mishin A.V., Prilepin M.T. et al. Modern geodynamics of the Caucasus (according to the results of GPS measurements and seismic data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 1999. No. 9. pp. 3–18.

42. Srijayanthi G., Ravi Kumar M., Gahalaut V.K. A review of seismological research in India during the past five years (2015–2019). In: *Proc. Indian Natn. Sci. Acad.* 2020. Vol. 86. No.1. pp. 531–552. DOI: 10.16943/ptinsa/2020/49794

43. Tan O., Taymaz T. Active tectonics of the Caucasus: Earthquake source mechanisms and rupture histories obtained from inversion of teleseismic body waveforms. Dilek Y., Pavlides S. (eds.). *Postcollisional tectonics and magmatism in Mediterranean region and Asia: Geological Society of America Special Paper*. 2006. Vol. 409. pp. 531–578. DOI: 10.1130/2006.2409 (25).

44. Thatcher W. GPS constraints on the kinematics of continental deformation. *International Geology Review*. 2003. Vol. 45. pp. 191–212. DOI: 10.2747/0020-6814.45.3.191.

45. Tibaldi A., Bonali F.L., Russo E., Pasquare Mariotto F.A. Structural development and stress evolution of an arcuate fold-and-thrust system, southwestern Greater Caucasus, Republic of Georgia. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018. Vol. 156(1). pp. 226–245. DOI: Org/10.1016/j.jseaes.2018.01.025.

46. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A. et al. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020. Vol. 88. pp. 104108. DOI: 10.1016/j.jseaes.2019.104108.

47. Trifonov V.G. Collision and mountain building. *Geotectonics*. 2016. No. 1. pp. 3–24.

48. Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Polyakova T.P., Shumilina L.S. On the assessment of seismic hazard in the North Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2007. No. 7. pp. 31–45.

49. Zaalishvili V.B., Rogozhin E.A. Assessment of Seismic Hazard of Territory on Basis of Modern Methods of Detailed Zoning and Seismic Microzonation. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 2011, 5. pp. 30–40.

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34; 539.3

[DOI: 10.46698/VNC.2022.75.85.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.75.85.004)

Оригинальная статья

Об определении механического состояния тектонических разломов

В.А. Бабешко^{1, 2}, О.В. Евдокимова², О.М. Бабешко¹, В.С. Евдокимов²¹Кубанский государственный университет, Россия, 350059, г. Краснодар,
ул. Ставропольская, 149, e-mail: rector@kubsu.ru;²Южный научный центр Российской академии наук, Россия, 344005, Ростов-на-Дону,
пр. Чехова, 41, e-mail: ras@ssc-ras.ru, babeshko41@mail.ru

Статья поступила: 06.04.2022, доработана: 11.05.2022, одобрена в печать: 17.05.2022

Резюме: Актуальность работы следует из необходимости решения проблемы более точного прогноза возможности возникновения стартового землетрясения для случаев различного механического строения литосферных плит. **Целью проведенных исследований** явилось решение задачи оценки прочностных свойств берегов тектонического разлома литосферных плит при применении новых математических методов. Разрушения берегов разломов вблизи основания являются причиной стартовых землетрясений. **Методы работы.** Изучается тот случай, когда разлом формируется в результате встречного приближения торцов гранитных фрагментов литосферных плит находящихся на базальтовом основании на границе Конрада, или образуется в результате изгибного разрушения плиты при субдукции. В процессе исследования применяется новый прогрессивный математический аппарат – метод блочного элемента, позволяющий аналитически получать высокоточные решения граничных задач, недоступных для анализа иными методами. **Результатом исследования** явилась разработка нескольких математических подходов, специально разработанных авторами для исследования и решения поставленных задач. Прежде всего, впервые начала строго математически разрабатываться теория контактных задач с деформируемыми штампами в дополнение к случаям абсолютно жестких штампов. Во-вторых, создан новый универсальный метод моделирования, позволяющий решения векторных граничных задач для систем дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих материалы сложных реологий, представлять разложенными по решениям отдельных скалярных граничных задач. В процессе построения теории контактных задач с деформируемыми штампами возникают новые неизвестные функционалы, определение которых необходимо для решения проблемы. С помощью новых методов в работе доказана возможность получения соотношений, позволяющих оценивать степень опасности разрушения разлома, поскольку удается получить все недостающие для этого параметры.

Ключевые слова: литосферные плиты, стартовое землетрясение, контактная задача, интегральное уравнение, функционалы решения

Благодарности: Отдельные фрагменты работы выполнены в рамках реализации Госзадания на 2022 г. Минобрнауки, проект (FZEN-2020-0020), ЮНЦ РАН проект (00-22-13) № госрегистрации 122020100341-0, и при поддержке грантов РФФИ (19-41-230003), (19-41-230004), (19-48-230014).

Для цитирования: Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Евдокимов В.С. Об определении механического состояния тектонических разломов. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12(2): 53-66. DOI: 10.46698/VNC.2022.75.85.004.

GEOFYSICS

DOI: [10.46698/VNC.2022.75.85.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.75.85.004)

Original paper

Determination of the mechanical state of tectonic faults

V.A. Babeshko^{1, 2}, O.V. Evdokimova², O.M. Babeshko¹, V.S. Evdokimov²

¹Kuban State University, 149 Stavropol str., Krasnodar 350059, Russian Federation,
e-mail: rector@kubsu.ru;

²Federal State Budget Institution of Science "Federal Research Centre the Southern Scientific
Centre of the Russian Academy of Sciences", 41 Chekhov Ave., Rostov-on-Don 344006,
Russian Federation, e-mail: ras@ssc-ras.ru, babeshko41@mail.ru

Received: 06.04.2022, revised: 11.05.2022, accepted: 17.05.2022

Abstract: The relevance of the work follows from the need to solve the problem of a more accurate prediction of the possibility of a starting earthquake for cases of various mechanical structures of lithospheric plates. The aim of the research was to solve the problem of assessing the strength properties of the shores of the tectonic fault of lithospheric plates when applying new mathematical methods. The destruction of the fault banks near the base is the cause of the initial earthquakes. **Methods.** The case is studied when the fault is formed as a result of the oncoming approach of the ends of granite fragments of lithospheric plates located on a basalt base at the Conrad boundary, or formed as a result of flexural plate destruction during subduction. In the process of research, a new progressive mathematical apparatus is used – the block element method, which allows analytically obtaining high-precision solutions to boundary value problems that are not available for analysis by other methods. **The result** of the study was the development of several mathematical approaches specially developed by the authors for the study and solution of the tasks. First of all, the theory of contact problems with deformable stamps began to be developed strictly mathematically for the first time in addition to cases with absolutely rigid stamps. Secondly, a new universal modeling method has been created that allows solutions of vector boundary value problems for systems of partial differential equations describing materials of complex rheologies to be decomposed according to solutions of individual scalar boundary value problems. In the process of constructing the theory of contact problems with deformable stamps, new unknown functionals arise, the definition of which is necessary to solve the problem. With the help of new methods, the possibility of obtaining ratios that allow us to assess the degree of danger of fracture destruction is proved in the work, since it is possible to obtain all the missing parameters for this.

Keywords: lithospheric plates, starting earthquake, contact problem, integral equation, functionals solution.

Acknowledgments: Some fragments of the work were carried out as part of the implementation of the State Assignment for 2022 of the Ministry of Education and Science, Project (FZEN-2020-0020), SSC RAS project (00-22-13) state registration number 122020100341-0, and with the support of RFBR grants (19-41-230003), (19-41-230004), (19-48-230014).

For citation: Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Evdokimov V.S. Determination of the mechanical state of tectonic faults. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12(2): 53-66. DOI: 10.46698/VNC.2022.75.85.004.

Введение

В работе впервые исследуется проблема оценки прочностных свойств разломов тектонических плит. Изучается тот случай, когда разлом формируется в результате встречного приближения торцов гранитных фрагментов литосферных плит, находящихся на базальтовом основании на границе Конрада.

В процессе исследования применяется новый прогрессивный математический аппарат – метод блочного элемента, позволяющий аналитически получать высокоточные решения граничных задач, недоступных для анализа иными методами. Исследование подобной задачи, в предположении моделирования гранитных фрагментов пластинами Кирхгофа, привело к обнаружению «стартовых землетрясений», единственных, которые возможно прогнозировать. Эти землетрясения возникают не в связи с взаимодействием между торцами литосферных плит, а по причине возникновения сингулярной концентрации контактных напряжений сблизившихся литосферных плит на основании. Такая концентрация напряжений, всегда вызывает разрушение среды и возникает при всех, как вертикальных, так и горизонтальных, перемещениях литосферных плит. Землетрясения вызывают в реальных зонах эпицентров такие же подвижки дневной поверхности, как и расчетные. Результаты опубликованы в ведущих зарубежных журналах. Стартовые землетрясения обнаружены при моделировании литосферных плит пластинами Кирхгофа. Встает вопрос о стартовых землетрясениях при замене моделей Кирхгофа плитами линейной теории упругости, описываемыми уравнениями Ламе, а также материалами иных реологий. Для исследования этих вопросов разработано несколько математических подходов, позволяющих преодолеть возникшие сложности. Строго математически разрабатывается теория контактных задач с деформируемыми штампами в дополнение к случаям с абсолютно жесткими штампами и создан новый универсальный метод моделирования. Метод позволяет решения векторных граничных задач для систем дифференциальных уравнений в частных производных, представлять разложенными по решениям отдельных скалярных граничных задач. Вместе с последними опубликованными результатами это позволяет получать все недостающие для оценки состояния разломов параметры.

К применению методов механики в решении проблемы прогноза сейсмичности призывал директор Института физики Земли АН СССР, академик Г.А. Гамбургцев. Он писал [Гамбургцев, 1982]: «Изыскание методов прогноза времени землетрясений следует направить в первую очередь в сторону поиска механических предвестников землетрясений. Такие поиски могут быть успешными только в том случае, если они будут основываться на глубоком изучении всех деталей механизма быстрых и медленных движений блоков земной коры сейсмоактивных районов». Метод блочного элемента также не случаен в проводимых исследованиях. Следующему директору Института физики Земли АН СССР, академику М.А. Садовскому [Садовский и др., 1987] принадлежит утверждение о невозможности прогноза землетрясений, основываясь лишь на слоистом строении коры Земли, необходимо учитывать реально существующие блочные модели. Именно эти рекомендации выдающихся ученых, глубоко понимающих тонкости проблемы, побудили авторов провести исследование одной из механических моделей. Заметим, что геофизики всегда стремились к применению глубоких математических методов в своих исследованиях.

Достаточно сказать, что даже выдающийся математик, лауреат Нобелевской премии Л.В. Канторович также заинтересовался проблемой прогноза землетрясений, развив теорию, основанную на вероятностном подходе [Канторович и др., 1970].

Вероятностные методы для прогноза землетрясений совершенствуются в последнее время в [Zavyalov, 2016]. Можно отметить глубокие исследования геофизиков Северного Кавказа проблемы сейсмичности и прогноза, внесших заметный вклад в эту отрасль науки и добившихся мирового признания [Заалишвили и др., 2021; Chernov et al., 2020; Чотчаев и др., 2021]. Различные подходы и методы приведены в многочисленных публикациях [Reid, 1910; Gutenberg, Richter, 1954; Rice, 1982; Ide, Berosa, 2001; Di Toro, 2011; Passelegue, Goldsby, 2014; Freed, 2005; Bouchon et al., 2013; Blanpied et al., 1991; Babeshko et al., 2016, 2018; Mitchell et al., 2013, 2015].

Исследованию коровых землетрясений, возникающих в связи с внутренними процессами в коре Земли посвящена монография [Добровольский, 2009]. В ней дан обзор подходов и взглядов разных исследователей на процесс подготовки землетрясений и их протекание. Автором предпринята попытка применения механических методов для решения проблемы прогноза. Она содержит ряд механико-математических исследований разрушения деформируемого материала в связи с образованием неоднородностей, возникающих при больших деформациях в линейных и нелинейных постановках. Особую значимость в этой монографии имеют обзоры различных исследователей в проблеме прогноза землетрясений. И.П. Добровольскому в монографии [Добровольский, 2009] принадлежит изречение, которое является наиболее близким к обнаружению стартовых землетрясений и сформулировано именно в год начала разработки теории блочного элемента. Говоря о стадиях подготовки землетрясений, он пишет, стр. 131: «Стадия асейсмического состояния сменяется фазой консолидации, на которой два блока (отдельности) входят в относительно прочное зацепление, образуя консолидированную область или неоднородность...». По мнению авторов, в достаточно полном описании всех стадий подготовки корового землетрясения, автор не проверил стадию процесса сближения блоков при создании зацепления. Так получилось в связи с тем, что теории блочного элемента в то время не было и точно решить эту контактную задачу с деформируемыми штампами – сближившимися литосферными плитами, не удалось. Это не дало возможности точно выяснить наличие сингулярной концентрации контактных напряжений в зоне сближившихся литосферных плит до зацепления, хотя численно многие наблюдали рост напряжений (рис. 1).

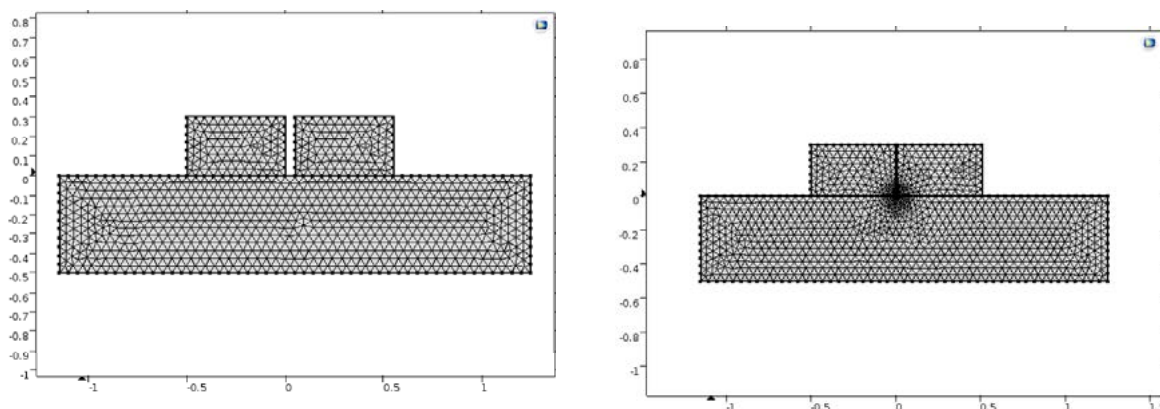


Рис. 1. Нарастание концентрации контактных напряжений под сближающимися торцами литосферных плит. Численный расчет /

Fig. 1. An increase in the concentration of contact stress under the approaching edges of the lithospheric plates. Numerical calculation

Построенная авторами математически точная модель сближения литосферных плит привела к новым результатам, опубликованным в ведущем журнале в области механики [Babeshko et al., 2016, 2018]. Новым строго математическим методом, разработанным авторами и названным методом блочного элемента, была изучена модель сближения полубесконечных литосферных плит, а точнее, гранитных фрагментов литосферных плит, торцами, образующими разлом (рис. 2). Фрагменты литосферных плит находятся на базальтовом основании, на границе Конрада. Разломы не являются сплошными, вплоть до астеносферы, иначе, благодаря спредингу, магма просачивалась бы по ним до поверхности, что не имеет места. Целое базальтовое основание принуждает магму искать выход в зонах вулканов. Как установлено американскими учеными [Mitchell et al., 2013, 2015], гранит при 600°C начинает оплавляться и скользит по базальту.

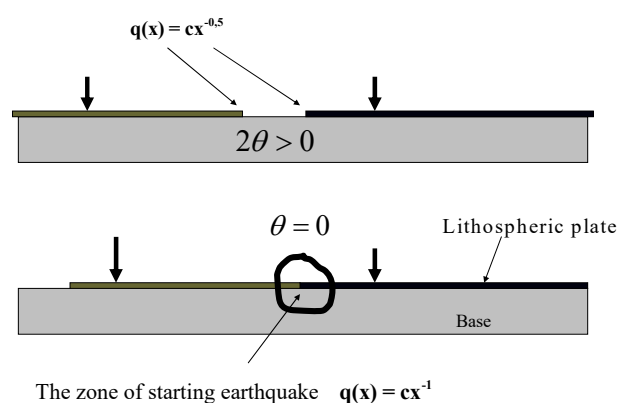


Рис. 2. Сближение торцами литосферных плит вплоть до возникновения стартового землетрясения /

Fig. 2. Approximation of the edges of the lithospheric plates up to the origin of an initial earthquake

В выполненных исследованиях [Babeshko et al., 2018] получена и обоснована модель, позволяющая выявлять момент разрушения среды, возникшими по краям разлома в зоне контакта литосферных плит с основанием сингулярными концентрациями контактных напряжений. Разрушения начинаются как только между торцами полубесконечных литосферных плит исчезает расстояние, но они не воздействуют друг на друга. Поэтому землетрясение названо «стартовым», так как происходит раньше корового, вызываемого взаимодействием торцов плит. В зоне эпицентра землетрясения методом блочного элемента осуществлен расчет по полученным теоретическим результатам [Babeshko et al., 2018], показывающий вертикальную подвижку на дневной поверхности. Там же приводится подвижка реально произошедшего в Спитаке землетрясения (рис. 3). Это видно на примере обычных ножниц, разрезающих ткань или бумагу. Когда их ножны сближены, процесс успешен, когда разведены, разрезать трудно.

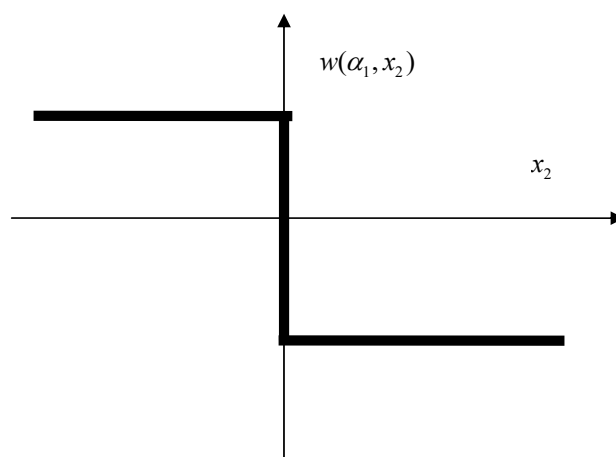


Рис. 3. Расчетное поведение подвижки поверхности и уступ излома в зоне максимального взброса на участке между Спитаком и с. Гехасар после Спитакского землетрясения /

Fig. 3. The calculated behavior of the surface displacement and the fracture ledge in the zone of the maximum overfault in the area between Spitak and the village of Gekhasar after the Spitak earthquake

Однако, для точной оценки прочностного состояния берегов разломов литосферных плит, в подходе, примененном в работах [Babeshko et al., 2018] оставался неопределенным функционал решения. Он не влиял на качественные характеристики решения, однако, для правильной количественной оценки прочностного состояния берегов разломов, этого недостаточно. Выяснилось, что для решения проблемы определения функционалов требуется разработать теорию контактных задач для случая деформируемых штампов. Ранее была разработана эта теория для случая абсолютно твердых штампов [Галин, 1980; Ворович, Бабешко, 1979]. В более ранней работе авторов поставлена и получено точное решение контактной задачи для отдельного деформируемого штампа, описываемого граничной задачей для уравнений Гельмгольца. В ней показано, каким образом определяются возникающие при этих исследованиях функционалы. В настоящем исследовании рассматривается более сложная проблема совместного взаимодействия двух полубесконечных ли-

тосферных плит, описываемая граничными задачами для уравнения Гельмгольца, в которых также возникают функционалы, требующие определения. В этой работе впервые показано, что и при совместном действии деформируемых штампов на поверхность, все функционалы возможно определить. Этот результат, с применением нового универсального метода моделирования, позволяет получать решение этой задачи для плит, состоящих из материалов сложной реологии [Бабешко и др., 2021]. Именно такую реологию имеют реальные литосферные плиты, фрагменты которых могут изменяться в зоне Беньофа в процессе субдукции.

Постановка задачи

Ниже представлено краткое изложение формирования подобных моделей и показано, что они позволяют получать недостающие параметры предыдущих подходов. Это дает возможность более точно получать прочностные характеристики берегов разлома на предмет наблюдения за их поведением.

В связи с наличием приливных притяжений кора земли, как многослойная линейно деформируемая среда, находится в условиях вибрации, описываемой функцией $e^{-i\omega t}$. Считаем, что вертикальные внешние воздействия на многослойную среду характеризуются такой же временной функцией. Исключая эту функцию из уравнений и граничных условий, приходим к стационарной граничной задаче. На ее верхней границе вводится декартова система координат, таким образом, что ось ox_3 направлена по внешней нормали, остальные оси ox_1, ox_2 лежат в касательной плоскости. Предполагается, что в областях $W_A(-\infty \leq x_1 \leq -A, |x_2| \leq \infty)$ и $W_A(A \leq x_1 \leq \infty, |x_2| \leq \infty)$ находится простейшая модель литосферной плиты, описываемая граничной задачей для дифференциальных уравнений Гельмгольца.

$$\begin{aligned} & [\partial^2 x_1 + \partial^2 x_2 + p^2] \varphi_{-A}(x_1, x_2) = g(x_1, x_2), \quad g(x_1, x_2) = q(x_1, x_2) - t(x_1, x_2), \\ & \Omega_{-A}(-\infty \leq x_1 \leq -A, |x_2| \leq \infty) \\ & [\partial^2 x_1 + \partial^2 x_2 + p^2] \varphi_A(x_1, x_2) = g(x_1, x_2), \quad g(x_1, x_2) = q(x_1, x_2) - t(x_1, x_2), \\ & \Omega_A(A \leq x_1 \leq \infty, |x_2| \leq \infty) \end{aligned} \quad (1)$$

С граничными условиями:

$$\varphi_{-A}(x_1, x_2) = \varphi(-A, x_2), \quad x_1 \rightarrow -A, \quad \varphi_A(x_1, x_2) = \varphi(A, x_2), \quad x_1 \rightarrow A,$$

Применив в уравнении (1) преобразование Фурье по координате x_2

$$\varphi(x_1, \alpha_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x_1, x_2) e^{i\alpha_2 x_2} dx_2$$

приходим к одномерной граничной задаче с параметром α_2 .

$$\begin{aligned} & (\partial^2 x_1 + k^2) \varphi_{-A}(x_1, \alpha_2) = g_{-A}(x_1, \alpha_2), \quad \Omega_{-A}(-\infty \leq x_1 \leq -A), \quad k^2 = p^2 - \alpha_2^2 \\ & (\partial^2 x_1 + k^2) \varphi_A(x_1, \alpha_2) = g_A(x_1, \alpha_2), \quad \Omega_A(A \leq x_1 \leq \infty,) \\ & g_{-A}(x_1, \alpha_2) = q_{-A}(x_1, \alpha_2) - t_{-A}(x_1, \alpha_2), \quad g_A(x_1, \alpha_2) = q_A(x_1, \alpha_2) - t_A(x_1, \alpha_2), \\ & \varphi(x_1) = \varphi(x_1, \alpha_2), \quad \varphi(x_1, \alpha_2) = \varphi(\pm A, \alpha_2), \quad x_1 \rightarrow \pm A, \\ & \varphi_{-A}(x_1, \alpha_2) = \varphi(-A, \alpha_2), \quad x_1 \rightarrow -A, \quad \varphi_A(x_1, \alpha_2) = \varphi(A, \alpha_2), \quad x_1 \rightarrow A, \end{aligned} \quad (2)$$

Параметр α_2 в дальнейшем, ради краткости, опускается, хотя во всех функциях он присутствует, и возврат к нему произойдет по формулам (7) после решения следующей одномерной граничной задачи:

$$\begin{aligned} (\partial^2 x_1 + k^2) \varphi_{-A}(x_1) &= g_{-A}(x_1), \quad \Omega_{-A}(-\infty \leq x_1 \leq -A), \quad k^2 = p^2 - \alpha_2^2 \\ (\partial^2 x_1 + k^2) \varphi_A(x_1) &= g_A(x_1), \quad \Omega_A(A \leq x_1 \leq \infty), \\ g_{-A}(x_1) &= q_{-A}(x_1) - t_{-A}(x_1), \quad g_A(x_1) = q_A(x_1) - t_A(x_1), \\ \varphi(x_1) &= \varphi(x_1), \quad g(x_1) = g(x_1), \quad \varphi(x_1) = \varphi(\pm A), \quad x_1 \rightarrow \pm A, \\ \varphi_{-A}(x_1) &= \varphi(-A), \quad x_1 \rightarrow -A, \quad \varphi_A(x_1) = \varphi(A), \quad x_1 \rightarrow A, \end{aligned} \quad (3)$$

В качестве литосферой плиты, моделированной уравнением Гельмгольца, можно рассматривать мембрану, допускающую представление в виде фрактала – упакованного блочного элемента, участвующего в описании решений сложных векторных граничных задач [Бабешко и др., 2021]. Она имеет внешнее воздействие, как по границе, описываемое функциями $\varphi(A)$ и $\varphi(-A)$, так и на поверхности. Считаем, что q_A и q_{-A} являются контактными напряжениями, действующими на мембрану со стороны многослойной среды, а t_A и t_{-A} являются внешними давлениями сверху.

Метод исследования

Для исследования построим упакованные блочные элементы, порождаемые граничной задачей (3). Для этого можно применить метод, детально изложенный в [Babeshko et al., 2018].

В результате его применения строятся внешние формы для каждой граничной задачи, которые принимают вид:

$$\begin{aligned} \omega_{-A}(\alpha_1) &= -i(\alpha_1 + k) \varphi_{-A}(-C) e^{-i\alpha_1 C} + Q_{-A}(-k) e^{-i(\alpha_1 + k)C} - \\ &- Q_{-A}(\alpha_1) - T_{-A}(-k) e^{-i(\alpha_1 + k)C} + T_{-A}(\alpha_1) \\ \omega_A(\alpha_1) &= i(\alpha_1 - k) \varphi_A(A) e^{i\alpha_1 A} + Q_A(k) e^{i(\alpha_1 - k)A} - Q_A(\alpha_1) - T_A(k) e^{i(\alpha_1 - k)A} + T_A(\alpha_1) \end{aligned}$$

Здесь приняты обозначения преобразований Фурье строчных букв заглавными

$$\Phi(\alpha_1) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x_1) e^{i\alpha_1 x_1} dx_1$$

С помощью построенных внешних форм, перемещения мембраны можно представить упакованными блочными элементами в виде [Babeshko et al., 2018]:

$$\begin{aligned} \varphi_r(x_1) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_r(\alpha_1) e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1, \quad \Phi_r(\alpha_1) = \frac{\omega_r(\alpha_1)}{N(\alpha_1)}, \quad r = A, -A, \\ N(\alpha_1) &= (\alpha^2 - k^2) \end{aligned}$$

Связь между граничными напряжениями и перемещениями на поверхности упругой среды, на которой находится литосферная плита, имеет вид:

$$u_r(x_1) = \int_{-\infty}^{-A} k(x_1 - \xi_1) q_{-A}(\xi_1) d\xi_1 + \int_A^{\infty} k(x_1 - \xi_1) q_A(\xi_1) d\xi_1,$$

$$k(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(\alpha_1) e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1,$$

где $K(\alpha_1)$ – четная аналитическая функция комплексного переменного α_1 , в частности, мероморфная, ее примеры приведены в многочисленных публикациях, например, в [Ворович, Бабешко, 1979].

В случае многослойной среды функция $K(\alpha_1)$ является мероморфной, имеющей счетное число нулей и полюсов. Им свойственно асимптотическое поведение вида:

$$\xi_s = ir(s + 0.5)(1 + o(1)), \quad s \rightarrow \infty, \quad z_m = ir m(1 + o(1)), \quad s \rightarrow \infty, \quad r = \text{const} > 0$$

В динамическом случае при достаточно большой частоте ω появляется конечное число вещественных нулей и полюсов. В этом случае в представлении ядро интегрального уравнения описывается интегралом, берущимся по контуру, имеющему вид

$$k(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{\gamma} K(\alpha_1) e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1$$

Контур γ совпадает с вещественной осью всюду, кроме зон вещественных полюсов, которые обходятся им по полуокружностям малого радиуса [Ворович, Бабешко, 1979].

Балансы перемещений поверхности многослойной среды и мембран представим в форме:

$$u_r(x_1) = \varphi_r(x_1), \quad x_1 \in \Omega_r$$

В преобразованиях Фурье получаем соотношения:

$$\begin{aligned} K(\alpha_1) Q_{-A}(\alpha_1) &= (\alpha_1^2 - k^2)^{-1} [-Q_{-A}(\alpha_1) + S_{-A}], \\ [K(\alpha_1) + (\alpha_1^2 - k^2)^{-1}] Q_{-A}(\alpha_1) &= (\alpha_1^2 - k^2)^{-1} S_{-A} \\ K(\alpha_1) Q_A(\alpha_1) &= (\alpha_1^2 - k^2)^{-1} [-Q_A(\alpha_1) + S_A], \\ [K(\alpha_1) + (\alpha_1^2 - k^2)^{-1}] Q_A(\alpha_1) &= (\alpha_1^2 - k^2)^{-1} S_A \\ S_{-A} &= -i(\alpha_1 + k) \varphi_{-A}(-A) e^{-i\alpha_1 A} + Q_{-A}(-k) e^{-i(\alpha_1 + k)A} - T_{-A}(-k) e^{-i(\alpha_1 + k)A} + T_{-A}(\alpha_1) \\ S_A &= i(\alpha_1 - k) \varphi_A(A) e^{i\alpha_1 A} + Q_A(k) e^{i(\alpha_1 - k)A} - T_A(k) e^{i(\alpha_1 - k)A} + T_A(\alpha_1) \end{aligned}$$

Из этих соотношений можно видеть, что наряду с требуемыми для определения неизвестными преобразованиями Фурье контактных напряжений $Q_A(\alpha_1)$ и $Q_{-A}(\alpha_1)$, свойственными контактными задачам с абсолютно жестким штампом, в правых частях у функций $S_A(\alpha_1)$ и $S_{-A}(\alpha_1)$ появляются неизвестные функционалы $Q_A(k)$ и $Q_{-A}(-k)$. Это новое свойство возникло в связи с решением контактной задачи с деформируемым штампом. Без определения этих параметров, найти точные оценки поведения контактных напряжений в этих задачах нет возможности.

Для решения поставленной проблемы составим в преобразованиях Фурье уравнение перемещения всей поверхности многослойной среды с учетом обеих контактных зон, а также бесконтактной зоны. Оно имеет вид:

$$K(\alpha_1) Q_{-A}^-(\alpha_1) + W(\alpha_1) + K(\alpha_1) Q_A^+(\alpha_1) = (\alpha_1^2 - k^2)^{-1} (S_{-A}^- + S_A^+) \quad (4)$$

С учетом аналитических свойств функций, сведем его к обобщенному уравнению Винера-Хопфа, приняв обозначения:

$$Q_{-A}^-(\alpha_1) \equiv Q_{-A}(\alpha_1), \quad S_{-A}^- \equiv S_{-A}(\alpha_1) \quad Q_A^+(\alpha_1) \equiv Q_A(\alpha_1), \quad S_A^+(\alpha_1) \equiv S_A(\alpha_1).$$

Знак плюс означает регулярность аналитической функции комплексного переменного в верхней полуплоскости, а минус – в нижней. Здесь в (4) $W(\alpha_1)$ – преобразование Фурье перемещения свободной от внешних воздействий зоны поверхности, находящейся между зонами контакта Ω_r , $r = -A, A$.

Соотношения (4) представляют обобщенные функциональные уравнения типа Винера-Хопфа относительно неизвестных $Q_{-A}^-(\alpha_1)$, $Q_A^+(\alpha_1)$, $W(\alpha_1)$, а также функционалов $Q_{-A}(-k)$, $Q_A(k)$, входящих в правые части уравнений. Для их исследования и нахождения строятся интегральные уравнения [Ворович, Бабешко, 1979].

Метод факторизации

Применим для исследования функционального уравнения аппарат факторизации функций [Ворович, Бабешко, 1979], позволяющий свести его к отдельным интегральным уравнениям. С этой целью для четной функции $K(\alpha_1)$ осуществим факторизацию $K(\alpha_1) = K_+(\alpha_1)K_-(\alpha_1)$ таким образом, чтобы выполнялось соотношение $K_+(-\alpha_1) = K_-(\alpha_1)$.

Для факторизованных функций на вещественной оси справедливы оценки $K_{\pm}(\alpha_1) = O(\alpha_1^{-0.5})$, $|\alpha_1| \rightarrow \infty$.

Введя новые неизвестные $K_-(\alpha_1)Q_{-A}^-(\alpha_1)e^{i\alpha_1 A} = X_-(\alpha_1)$, $K_+(\alpha_1)Q_A^+(\alpha_1)e^{-i\alpha_1 A} = X_+(\alpha_1)$ и осуществив свойственные факторизационному методу операции [Ворович, Бабешко, 1979], получаем систему интегральных уравнений вида:

$$X_-(\alpha_1) - \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{K_-(\xi)X_+(\xi)e^{i\xi 2A}}{K_+(\xi)(\xi - \alpha_1)} d\xi = \{K_+^{-1}(\alpha_1)(\alpha_1^2 - k^2)^{-1}S_{-C}^-e^{-i\alpha_1 C}\}^-, \quad \text{Im } \alpha_1 < 0$$

$$X_+(\alpha_1) + \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{K_+(\xi)X_-(\xi)e^{-i\xi 2A}}{K_-(\xi)(\xi - \alpha_1)} d\xi = \{K_-^{-1}(\alpha_1)(\alpha_1^2 - k^2)^{-1}S_A^+e^{i\alpha_1 A}\}^+, \quad \text{Im } \alpha_1 > 0$$

Здесь использовано обозначение, заимствованное из [Ворович, Бабешко, 1979]:

$$\{R(\alpha_1)\}^{\pm} = \pm \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R(\xi)}{\xi - \alpha_1} d\xi, \quad \pm \text{Im } \alpha_1 > 0 \quad (5)$$

Взяв неизвестные $Y_1(\alpha_1) = X_+(\alpha_1) + X_-(-\alpha_1)$, приводим систему интегральных уравнений к отдельным уравнениям вида:

$$Y_2(\alpha_1) = -\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{K_-(\xi)Y_1(\xi)e^{i\xi 2A}}{K_+(\xi)(\xi + \alpha_1)} d\xi = \{K_-^{-1}(\alpha_1)(\alpha_1^2 - k^2)^{-1}S_A^+e^{i\alpha_1 A}\}^+ -$$

$$-\{K_+^{-1}(\alpha_1)(\alpha_1^2 - k^2)^{-1}S_{-A}^-e^{-i\alpha_1 A}\}^+$$

$$Y_1(\alpha_1) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{K_-(\xi)Y_1(\xi)e^{i\xi 2A}}{K_+(\xi)(\xi + \alpha_1)} d\xi = \{K_-^{-1}(\alpha_1)(\alpha_1^2 - k^2)^{-1}S_A^+e^{i\alpha_1 A}\}^+ +$$

$$+\{K_+^{-1}(\alpha_1)(\alpha_1^2 - k^2)^{-1}S_{-A}^-e^{-i\alpha_1 A}\}^+, \quad \text{Im } \alpha_1 \geq 0$$

Под интегралами справа находятся аналитические функции, поэтому интегральные операторы в правой части описываются интегралами Дирихле.

Опуская достаточно громоздкие выкладки, связанные со способами решения интегральных уравнений, изложенными в [Ворович, Бабешко, 1979], получаем следующее представление их решений:

$$\begin{aligned} Q_A(\alpha_1) &= M_{11}(\alpha_1)Q_A(k) + M_{12}(\alpha_1)Q_{-A}(-k) + M_1(\alpha_1) \\ Q_{-A}(\alpha_1) &= M_{21}(\alpha_1)Q_A(k) + M_{22}(\alpha_1)Q_{-A}(-k) + M_2(\alpha_1) \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь функции $M_{mn}(\alpha_1)$ имеют интегральное представление и зависят только от известных заданных функций внешних воздействий.

Отсюда, полагая в первом соотношении $\alpha_1 = k$, а во втором, $\alpha_1 = -k$, получаем однозначно разрешимую систему двух алгебраических уравнений, приведенную к виду:

$$\begin{aligned} [1 - M_{11}(k)]Q_A(k) - M_{12}(k)Q_{-A}(-k) &= M_1(k) \\ -M_{21}(-k)Q_A(k) + [1 - M_{22}(-k)]Q_{-A}(-k) &= M_2(-k) \end{aligned}$$

Из нее находятся оба функционала $Q_A(k)$ и $Q_{-A}(-k)$, представимые в форме:

$$\begin{aligned} Q_A(k) &= \Delta^{-1} \langle [1 - M_{22}(-k)]M_1(k) + M_{12}(k)M_2(-k) \rangle \\ Q_{-A}(-k) &= \Delta^{-1} \langle [1 - M_{11}(k)]M_2(-k) + M_{21}(-k)M_1(k) \rangle \\ \Delta &= [1 - M_{11}(k)][1 - M_{22}(-k)] - M_{12}(k)M_{21}(-k) \end{aligned}$$

После внесения их значений в правые части соотношений (6), получим представления (6) преобразований Фурье контактных напряжений $Q_A(\alpha_1)$, $Q_{-A}(\alpha_1)$ в форме, свободной от функционалов.

Вспоминая формулу (2), значения двумерных контактных напряжений окончательно можно представить в виде:

$$\begin{aligned} q_A(x_1, x_2) &= \frac{1}{4\pi^2} \int \int Q_A(\alpha_1, \alpha_2) e^{-i(x_1\alpha_1 + x_2\alpha_2)} d\alpha_1 d\alpha_2, \\ q_{-A}(x_1, x_2) &= \frac{1}{4\pi^2} \int \int Q_{-A}(\alpha_1, \alpha_2) e^{-i(x_1\alpha_1 + x_2\alpha_2)} d\alpha_1 d\alpha_2 \end{aligned} \quad (7)$$

В соответствии с разработанной в [Бабешко и др., 2021] теорией, построенные формулы для контактных напряжений могут использоваться для исследования описанных контактных задач с моделями литосферных плит, представленными материалами более сложных реологий, термоупругими, электроупругими и другой сложности [Заалишвили и др., 2017]. Возникающие при решении соответствующих функциональных и интегральных уравнений функционалы будут определяться по изложенной в настоящей статье схеме.

Результаты работы и их обсуждение

Как отмечено выше, модель стартовых землетрясений выявляет математически строго событие, когда литосферные плиты полностью сблизилась. В этом случае в зоне сближения возникает бесконечная концентрация напряжений, описываемая

сингулярностью x^{-1} [Babeshko et al., 2018]. Разумеется, в реальности, такая концентрация напряжений не достижима, так как разрушение среды произойдет раньше. Именно сближение берегов разлома, замеченное В.И. Уломовым, позволило точно предсказать землетрясение [Уломов и др., 2002]. Настоящее исследование является шагом к учету, как способности деформироваться литосферных плит разной реологии, так и оценке концентрации контактных напряжений под литосферными плитами при наличии различной дистанции между их торцами. В работе исследована ответственная задача о применимости к решению этой проблемы универсального метода моделирования [Бабешко и др., 2021] что доказывается возможностью определения всех параметров, функционалов, в этой модели.

Выводы

Если в более ранней статье рассмотрены случаи отдельных деформируемых штампов, то в настоящей работе изучается применение разработки к конкретной задаче сейсмологии, где совместно рассматриваются два деформируемых штампа. Можно пытаться решать смешанную граничную задачу с литосферными плитами из материалов сложной реологии, однако в таком случае решение будет крайне громоздким со множеством функционалов и требованием факторизации матрицы-функции. Переход к описанному в настоящей статье подходу, делает эту задачу гораздо более простой и разрешимой [Бабешко и др., 2021].

Литература

1. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. Фрактальные свойства блочных элементов и новый универсальный метод моделирования. // ДАН. – 2021. – Т. 499. – С. 21–26. DOI: 9.31857/S2686740021040039
2. Ворович И.И., Бабешко В.А. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. – М.: Наука, 1979. – 320 с.
3. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. – М.: Наука, 1980. – 303 с.
4. Гамбурцев Г.А. Перспективный план исследований по проблеме «Изыскание и развитие прогноза землетрясений». // Развитие идей Г.А. Гамбурцева в геофизике. – М.: Наука, 1982. – С. 304–311.
5. Добровольский А.Д. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. – М.: Физматлит, 2009. – 240 с.
6. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Габараев А.Ф., Мерзликин Т.И. Нелинейные колебания грунтовой толщи по инструментальным и численным данным. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №4. – С. 70–82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006
7. Заалишвили В.Б., Магкоев Т.Т., Чернов Ю.К., Туаев Г.Э. Влияние механического воздействия и криогенных условий на физико-химические характеристики горных пород. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – №1. – С. 17–23.
8. Канторович Л.В., Молчан Г.М., Кейлис-Борок В.И., Вилькович Е.В. Статистическая модель сейсмичности и оценка основных сейсмических эффектов. // Физика Земли. – 1970. – №5. – С. 85–102.
9. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М.: Наука, 1987. – 104 с.
10. Уломов В.И., Полякова Т.А., Медведева Н.В. О долгосрочном прогнозе сильных землетрясений в Центральной Азии и Черноморско-Каспийском регионе. // Известия РАН, Физика Земли. – 2002. – №4. – С. 31–47.

11. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. On the possibility of predicting some types of earthquake by a mechanical approach. // *Acta Mechanica*. – 2018. – Vol. 229(5). – pp. 2163–2175 DOI: 10.1007/s00707-017-2092-0
12. Blanpied M.L., Lockner D.A., Byerlee J.D. Fault stability inferred from granite silding experiments at hydrothermal conditions. // *Geophysical Researche Letters*. – 1991. – Vol. 18(4). – pp. 609–617.
13. Bouchon M., Durand D., Marsan H., Karabulut H., Schmittbuhl J. The long precursory phase of most lalge interplanet earthquakes. // *Nature Geoscience*. – 2013. – Vol. 6. – pp. 299–302. DOI: 10.1038/NGEO1770.
14. Chernov Yu.K., Zaalishvili V.B., Chernov A.Yu. Strong ground motion simulation for forecasting the probable seismic impacts in the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 2020. – Vol. 56. No.5. – pp. 644–655. DOI: 10.1134/S1069351320050018.
15. Di Toro G., Han R., Hirose T. et al. Fault lubrication during earthquakes. // *Nature*. – 2011. – Vol. 471. – pp. 494–498. DOI: 10.1038/nature09838
16. Freed A.M. Earthquake triggering by static, dynamic and postseismic stress transfer. // *Annual Revue Earth Planet Science*. – 2005. – Vol. 33. – pp. 335–367.
17. Gutenberg B., Richter C. Seismicity of the Earth and associated phenomena. // *Princeton Univ. Press*. – 1954. – 310 p.
18. Ide S., Berosa G.S. Does apparent stress vary earthquake? // *Geophysical Researche Letters*. – 2001. – Vol. 28(17). – pp. 3349–3352.
19. Mitchell E., Fialko Y., Brown K. Temperature dependence of frictional healing of west-erly granite: Experimental observations and numerical Simulations. // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2013. – Vol. 14. – pp. 567–582.
20. Mitchell E., Fialko Y., Brown K. Frictional properties of gabbro at conditions correspond-ing to slow slip events in subduction zones. // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2015. – Vol. 16. – pp. 4006–4020.
21. Passelegue F.X., Goldsby D.L. The influence of ambient tempereche on flash-heating phenomena. // *Geophysical Researche Letters*. – 2014. – Vol. 41. – pp. 828–835.
22. Reid N.F. The Mechanism of the Earthquake. The California Earthquake of April 18, 1906. // *Rep. of the State Investigation Commiss.* – 1910. – Vol. 2. Pt. 1. – 56 p.
23. Rice J. Mechanics of earthquake focus. Moscow, Mir Publ., 1982. – 217 p.
24. Zavyalov A.D. Algorithm “map of expected earthquakes” (MEE) results of three decades of tesring and latests. // *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Co-operation*. – 2016. – Vol. 2. No.1. – pp. 80–88.

References

1. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. Fractal properties of block ele-ments and a New Universal Modeling Method. *DAN*. 2021. Vol. 499. pp. 21–26. DOI: 9.31857/S2686740021040039. (In Russ.)
2. Vorovich I.I., Babeshko V.A. Dynamic mixed problems of elasticity theory for non-classi-cal regions. Moscow. Nauka. 1979. 320 p. (In Russ.)
3. Galin L.A. Contact problems of the theory of elasticity and viscoelasticity. Moscow. Nau-ka. 1980. 303 p. (In Russ.)
4. Gamburtsev G.A. Perspective plan of research on the problem “Research and develop-ment of earthquake prediction”. Development of G.A. Gamburtsev ideas in geophysics. Mocow. Nauka. 1982. pp. 304–311. (In Russ.)
5. Dobrovolsky A.D. Mathematical theory of preparation and forecast of tectonic earthquake. Moscow. Fizmatlit. 2009. 240 p. (In Russ.)
6. Zaalishvili V.B., Mel’kov D.A., Gabaraev A.F., Merzlikin T.I. Nonlinear Oscillations of the Soil Thickness Based on Instrumental and Numerical Data. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 70–82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006.

7. Zaalishvili V.B., Magkoev T.T., Chernov Yu.K., Tuaeov G.E. Influence of mechanical action and cryogenic conditions on the physical and chemical characteristics of rocks. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2017. No. 1. pp. 17–23.
8. Kantorovich L.V., Molchan G.M., Keilis-Borok V.I., Vilkovich E.V. Statistical model of seismicity and evaluation of the main seismic effects. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 1970. No. 5. pp. 85–102. (In Russ.)
9. Sadovsky M.A., Bolkhovitinov L.G., Pisarenko V.F. Deformation of the geophysical environment and the seismic process. Moscow. Nauka. 1987. 104 p. (In Russ.)
10. Ulomov V.I., Polyakova T.A., Medvedeva N.V. On the long-term forecast of strong earthquakes in Central Asia and the Black Sea-Caspian region. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences, Physics of the Earth*. 2002. No. 4. pp. 31–47. (In Russ.)
11. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. On the possibility of predicting some types of earthquake by a mechanical approach. *Acta Mechanica*. 2018. Vol. 229. Issue 5. pp. 2163–2175. DOI: 10.1007/s00707-017-2092-0.
12. Blanpied M.L., Lockner D.A., Byerlee J.D. Fault stability inferred from granite silding experiments at hydrothermal conditions. *Geophysical Research Letters*. 1991. Vol. 18. Issue 4. pp. 609–617.
13. Bouchon M., Durand D, Marsan H., Karabulut H., Schmittbuhl J. The long precursory phase of most lalge interplanet earthquakes. *Nature Geoscience*. 2013. Vol. 6. pp. 299–302. DOI: 10.1038/NCEO1770.
14. Chernov Yu.K., Zaalishvili V.B., Chernov A.Yu. Strong ground motion simulation for forecasting the probable seismic impacts in the territory of the Republic of North Ossetia–Alania. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2020, Vol. 56, No. 5. pp. 644–655. DOI: 10.1134/S1069351320050018.
15. Di Toro G., Han R., Hirose T. et al. Fault lubrication during earthquakes. *Nature*. 2011. Vol. 471, pp. 494–498 DOI: 10.1038/nature09838
16. Freed A.M. Earthquake triggering by static, dynamic and postseismic stress transfer. *Annual Revue Earth Planet Sciense*. 2005. Vol. 33. pp. 335–367.
17. Gutenberg B., Richter C. Seismicity of the Earth and associated phenomena. Princeton Univ. Press. 1954. 310 p.
18. Ide S., Berosa G.S. Does apparent stress vary earthquake? *Geophysical Research Letters*. 2001. Vol. 28. Issue 17. pp. 3349–3352.
19. Mitchell E., Fialko Y., Brown K. Temperature dependence of frictional healing of west-erly granite: Experimental observations and numerical Simulations. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2013. Vol. 14. pp. 567–582.
20. Mitchell E., Fialko Y., Brown K. Frictional properties of gabbro at conditions correspond-ing to slow slip events in subduction zones. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2015. Vol. 16. pp. 4006–4020.
21. Passelegue F.X., Goldsby D.L. The influence of ambient tempereche on flash-heating phenomena. *Geophysical Research Letters*. 2014. Vol. 41. pp. 828–835.
22. Reid N.F. The Mechanism of the Earthquake. The California Earthquake of April 18, 1906. Reports of the State Investigation Commiss. 1910. Vol. 2. Pt. 1. 56 p.
23. Rice J. Mechanics of earthquake focus. Moscow, Mir Publ., 1982. 217 p.
24. Zavyalov A.D. Algorithm “map of expected earthquakes” (MEE) results of three decades of tesring and latests. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Co-operation*. 2016. Vol. 2. No.1. pp. 80–88.

УДК 550:34

DOI: [10.46698/VNC.2022.25.25.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.25.25.005)

Оригинальная статья

Исследование динамических характеристик многопролетного моста в Ереване по микросейсмическим колебаниям

Дж.К. Карапетян^{id}, О.Ю. Айрапетян^{id}, Г.М. Матевосян^{id},
Р.К. Карапетян^{id}

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: 19.04.2022, доработана: 23.05.2022, принята к публикации: 04.06.2022

Резюме: Актуальность работы. Изучение поведения сооружений в натурных условиях и сравнительный анализ их динамических характеристик является важной задачей как для научно-исследовательских целей, так и для прикладных, в частности для мониторинга их технического состояния, паспортизации. Задача является актуальной в особенности на территории Армении, учитывая высокую сейсмичность региона. В работе приводятся результаты экспериментальных исследований динамических характеристик многопролетного моста «Победы» от записей микросейсм с помощью специально разработанных в ИГИС НАН РА сейсмических приборов. Мост находится в Центре Еревана и имеет важное стратегическое значение для работы транспортной системы города. Выбор данного моста для исследования был осуществлен с учетом того, что до этого на нем проводились эксперименты для выявления его динамических характеристик. Довольно долгое время на этом сооружении не проводились подобные научно-исследовательские работы. **Целью работы** является проверка фактического состояния несущих элементов моста, сравнение фактических на сегодняшний день и ранее определенных динамических характеристик исследуемого моста. **Методы работы.** Используемая нами методика изучения поведения сооружений проведена с помощью мобильной сейсмостанции, состоящей из трех приемников – сейсмодатчиков СМ-3 (два горизонтальных и один вертикальный компонент), а также логгера производства ИГИС НАН РА, оснащенного беспроводной сетью (Wi-Fi), которая обеспечивает связь с портативным компьютером. На 6-ти характерных точках моста, а также на грунте основания проводились измерения микросейсм. Определялись частоты колебаний несущих элементов моста и грунтов в поперечном, продольном и вертикальном направлениях. Измерения были произведены в ночное время для того, чтобы колебания грунтов и моста были вызваны только естественными микросейсмами. **Результаты работы.** В результате исследования проведен сравнительный анализ полученных экспериментальных величин динамических характеристик и ранее полученных данных. В итоге было установлено, что обретенные новые величины частот микроколебаний моста в поперечном и продольном направлениях практически равны приобретенным старым экспериментальным соответствующим значениям частот. Кроме того обнаружены особенности совместной работы сооружения и грунта.

Ключевые слова: микросейсмы, динамические характеристики, несущие элементы моста, спектр Фурье, частоты колебаний сооружений.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке РА в рамках научного проекта № АСН-01/22.

Для цитирования: Карапетян Дж.К., Айрапетян О.Ю., Матевосян Г.М., Карапетян Р.К. Исследование динамических характеристик многопролетного моста в Ереване по микросейсмическим колебаниям. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12(2): 67-77. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.25.005.

DOI: [10.46698/VNC.2022.25.25.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.25.25.005)

Original paper

Investigation of the dynamic characteristics of the road bridge in Yerevan by recording microseisms

J.K. Karapetyan^{id}, H.Yu. Hayrapetyan^{id}, G.M. Matevosyan^{id}, R.K. Karapetyan^{id}

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

Received: 19.04.2022, revised: 23.05.2022, accepted: 04.06.2022

Abstract: Relevance. The investigation of the behavior of structures in natural conditions and a comparative analysis of their dynamic characteristics is an important task both for research purposes and for applied, particularly, for monitoring their technical condition and recertification. The problem is relevant chiefly on the territory of Armenia, given the intensive high seismicity of the country. The work presents the experimental results of examining the dynamic characteristics of a road bridge from microseismic records using seismic devices especially developed at IGES NAS RA. The bridge is located in the center of Yerevan and has an important significance. This bridge has been selected taking into account the fact that before that, experiments had been carried out on it to identify its dynamic characteristics. But for quite a long time, such research work has not been carried out at this facility. **The aim** of the paper is to check the actual state of the bridge, to compare the actual and previously acquired dynamic characteristics of the investigated bridge. **Methods.** The technique used by us to study the behavior of structures has been performed using a movable seismic station, which consists of 3 receivers - seismic sensors SM-3 (two horizontal and one vertical component), as well as a logger manufactured by IGES NAS RA, equipped with a wireless network (Wi-Fi), which provides communication with laptop computer. At 6 characteristic points of the bridge, as well as on its soil, the measurements of micro tremors have been carried out. The vibration frequencies of the bridge and soils in the transverse, longitudinal and vertical directions have been determined. The measurements have been made at night so that the vibrations of the soil and the bridge were caused only by natural microseisms. **Results.** As a result, a comparative analysis of the gained experimental values of dynamic characteristics and formerly obtained data has been executed. In the issue, it was found that the acquired new values of the frequencies of microseismic vibration of the bridge in the transverse and longitudinal directions are practically equal to the acquired old experimental corresponding frequencies. In addition, features of the joint work of the structure and soil have been found.

Keywords: microseisms, dynamic characteristics, bridge, Fourier spectrum, vibration frequencies of structures.

Acknowledgments: The work was supported by the Science Committee of RA, in the frames of the research project № ACH-01/22.

For citation: Karapetyan J.K., Hayrapetyan H.Yu., Matevosyan G.M., Karapetyan R.K. Investigation of the dynamic characteristics of the road bridge in Yerevan by recording microseisms. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii* = *Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12(2): 67-77. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.25.005.

Введение

Мосты представляют собой сооружения, перекрывающие пересекаемый барьер и прерывающие земляное полотно дороги. Исследуемый мост «Победы» является семипролётным арочным железобетонным, у которого перекрывают русло реки три центральных пролёта. Мост состоит из пролетных строений, поддерживающих

проезжую часть с тротуарами, и опор, передающих нагрузку от пролетных строений на грунт. В зависимости от материала, из которого сделаны пролетные строения, мосты бывают каменными, металлическими, бетонными, железобетонными и деревянными.

В наших предыдущих работах мы изучали динамические характеристики зданий, их фактическое состояние, а также сопоставляли полученные результаты с аналогичными данными, ранее полученными отечественными учеными [Карапетян и др., 2021]. Тем временем, изучая научные труды Б.К. Карапетяна, возник интерес выполнить сравнительный анализ динамических характеристик одного из сооружений, которое было ранее изучено [Карапетян, 1967].

Б.К. Карапетяном были испытаны следующие сооружения: дымовая труба Ереванской ТЭЦ, автодорожные мосты в Ереване через реку Раздан и в Аштараке через реку Кацах, а также башня Ереванского телецентра. В результате этих экспериментов были определены динамические характеристики сооружений [Карапетян, 1967].

В этих экспериментах динамические характеристики сооружений определялись экспериментальным способом при помощи микроколебаний зданий, которые были вызваны микросейсмическими воздействиями, и путем испытания зданий с применением специальной вибромашины, а также при сейсмовзрывных воздействиях. После 1967 года в течение долгого времени подобные исследования на этих сооружениях не проводились. Периодические исследования, определение динамических характеристик сооружений, особенностей и закономерностей спектрального состава их колебаний, а также сопоставление с ранее полученными данными имеют важное значение для сейсмостойкого строительства и инженерной сейсмологии [Оганесян, 2013].

Из вышеупомянутых сооружений, нами был выбран автомобильный мост «Победа», на котором были выполнены микросейсмические исследования для выяснения его фактического состояния, а также проведено сравнение их со старыми данными.

В работе Б.К. Карапетяна Разданский мост «Победа» был испытан и при движении автомобиля по мосту, его резком торможении, и при микроколебании. Грунтами основания опор моста являются базальты. Частота колебаний грунта составила 14 Гц . Колебания моста от микросейсм в поперечном направлении имели частоту равную $3,3 \text{ Гц}$, а в продольном направлении – 5 Гц . При движении автомобиля в поперечном и в продольном направлениях была получена частота в 1 Гц в середине моста и 14 Гц у опоры [Карапетян, 1967].

Описание сооружения. Авторы проекта моста «Победа» в Ереване – инженер С. Овнанян, архитекторы А. Мамиджаниян и А. Асатрян. Строительство моста началось в 1941 году и осуществлялось во время Второй мировой войны, при этом в строительстве участвовали немецкие военнопленные. Мост был открыт 25 ноября 1945 года, и являлся крупнейшим инженерным сооружением военного времени в Армянской ССР [Акопян, 1977].

Мост семипролётный арочный железобетонный, имеет 3 центральных пролёта, перекрывающих русло реки (рис. 1). Надсводное строение центральных пролётов выполнено в виде системы поперечных стенок, завершенных сводиками. По ширине пролётное строение разбито на три самостоятельных элемента, объединенных общей проезжей частью. Облицовка из базальта, обработанного «под шубу»

и чистую теску, усиливает впечатление монументальности [Арутюнян и др., 1955]. Длина моста составляет 200 м, ширина – 25 м, высота над уровнем реки – 34 м.

Мост предназначен для движения автомобильного транспорта и пешеходов. Проезжая часть включает в себя 8 полос для движения автотранспорта. Перильное ограждение, выполненное из элементов чугунного художественного литья, заканчивается на устоях каменным парапетом (архитекторы С. Сафарян, Г. Агабабян, скульптор А. Сарксян). Над опорами поставлены каменные колонны-столбы, украшенные фонарями [Арутюнян и др., 1955].

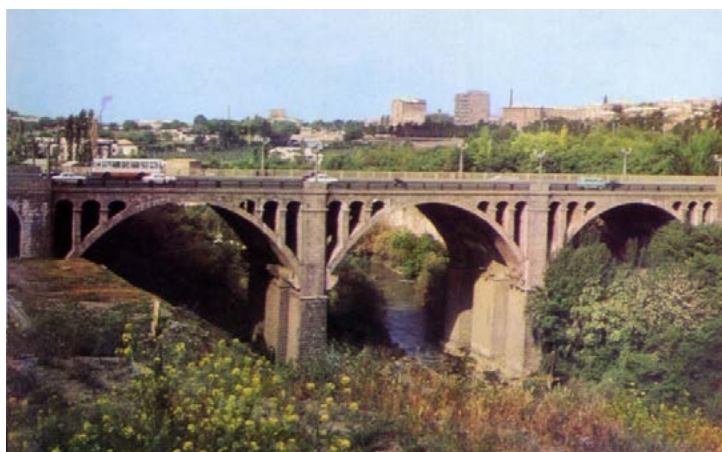


Рис. 1. Исследуемый мост «Победы», вид из Разданского ущелья /

Fig. 1. Investigated Victory Bridge, view from the Hrazdan Gorge

Задача исследования: определение периодов колебаний многопролетного моста «Победы» в городе Ереван и диагностика фактического состояния сооружения, сопоставление его фактических динамических характеристик со старыми экспериментальными значениями, и кроме того сравнение с доминирующими периодами грунтов его основания.

Методика исследования

Методика изучения поведения сооружения осуществлялась с помощью мобильной сеймостанции, которая состоит из 3-х сейсмодатчиков СМ-3 – двух горизонтальных и одного вертикального компонента, общего блока (логгер) преобразования, управления и регистрации производства ИГИС НАН РА, снаряженного беспроводной сетью (рис. 3). Частота записи – 200 отсчетов в секунду [Карапетян и др., 2021; Karapetyan et al., 2021].

Сейсмодатчики были поставлены в шести основных точках моста, а также на грунте основания (рис. 2). Измерения были произведены в ночное время для того, чтобы колебания грунта и сооружения были обусловлены только естественными микросейсмами.

Одним из важных преимуществ микросейсмических исследований является то обстоятельство, что число микроимпульсов, регистрируемых на поверхности Земли и на зданиях и сооружениях, очень велико, поэтому имеется возможность за короткие сроки без особых затрат получать большую информацию для анализа. При этом эта методика может быть использована для массовых исследований в различных периодах эксплуатации зданий и сооружений [Аносов и др., 2010; Еманов,

Скляр, 2009; Заалишвили и др., 2016; Савин и др., 2008; Хачиян, 2015; Юдахин, 2010; Ditommaso et al., 2012; Giacomo et al., 2005; Kapustian et al., 2013; Kawase et al., 2014; Khachian et al., 2013; Mucciarelli, 2003; Nakamura, 1997, 2008; Zaalishvili et al., 2016].



Рис. 2. Исследуемый мост «Победы», с показом точек, где осуществлялись измерения /

Fig. 2. Investigated Victory Bridge, with the points where the measurements were carried out



Рис. 3. Мобильная сеймостанция производства ИГИС НАН РА /

Fig. 3. Mobile seismic station produced by IGES NAS RA

Результаты работы и их обсуждение

Во всех исследуемых точках сооружения и грунта его основания определялись частоты колебаний в поперечном (X), продольном (Y) и вертикальном (Z) направлениях. Был выполнен спектральный анализ по приобретенным экспериментальным данным инструментальной записи.

Построены спектры Фурье, полученные от измерений микросейсмических колебаний моста. Ниже в графиках приведены спектры Фурье для исследуемых точек

(рис. 4–9). Определены динамические характеристики (частота, период, амплитуда колебаний) моста и грунта.

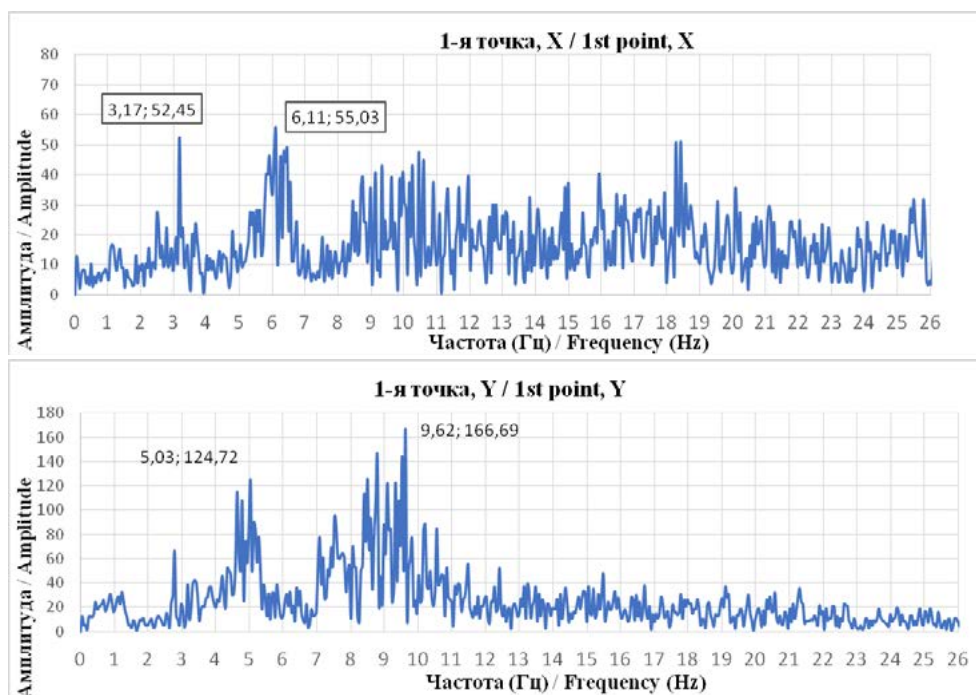


Рис. 4. Спектры Фурье, построенные от записей микросейсм в 1-й точке в X, Y направлениях /

Fig. 4. Fourier spectra built according tomicroseisms records at the 1st point in X, Y directions

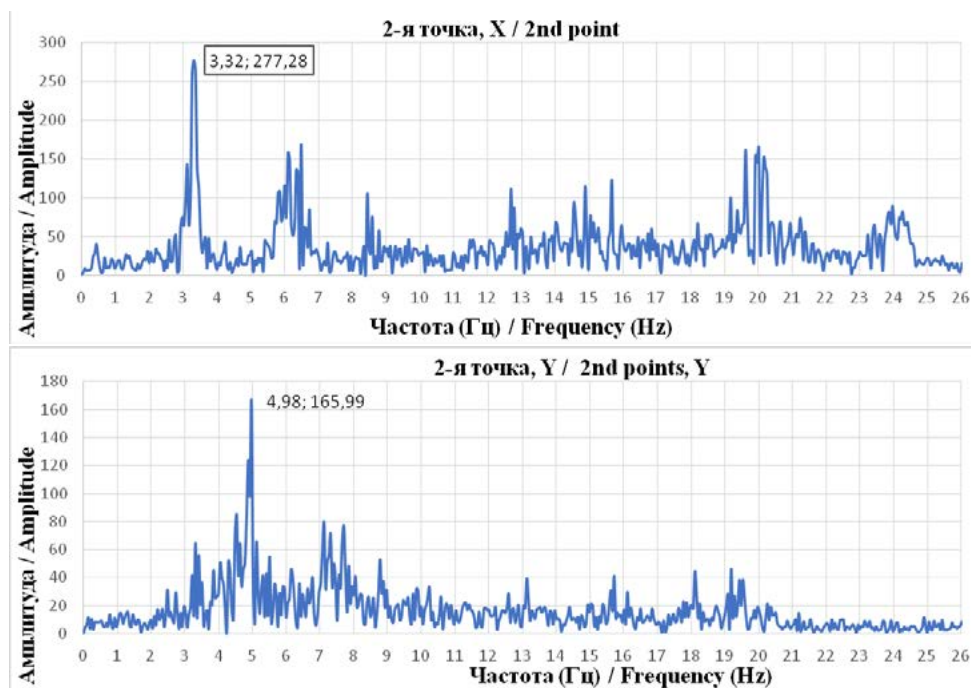


Рис. 5. Спектры Фурье, построенные от записей микросейсм во 2-й точке в X, Y направлениях /

Fig. 5. Fourier spectra built according tomicroseisms records at the 2nd point in X, Y directions

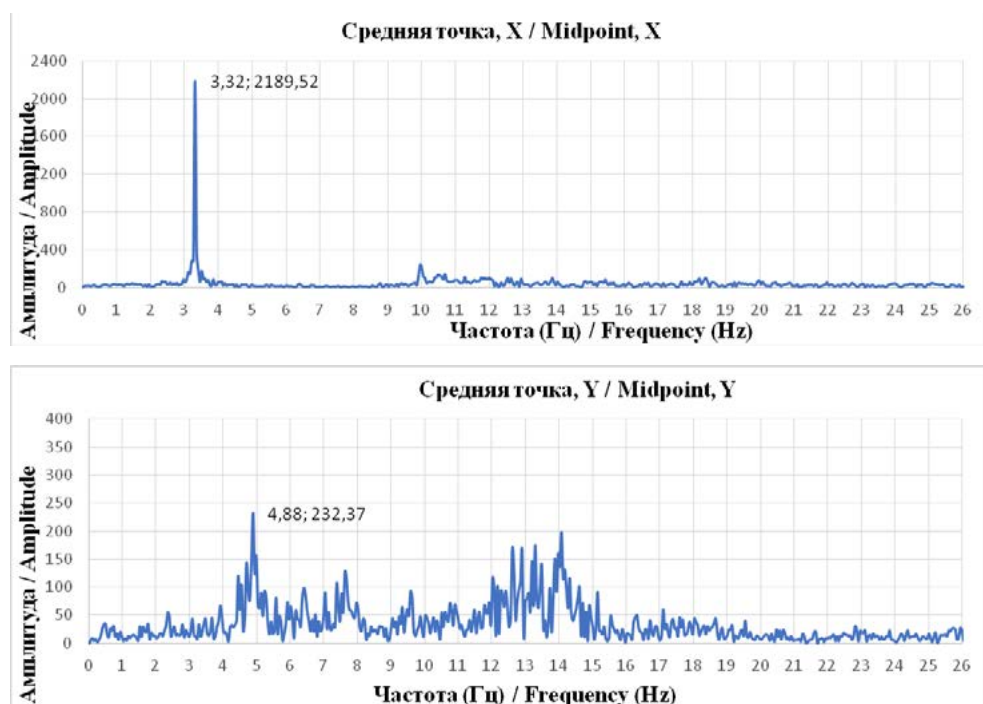


Рис. 6. Спектры Фурье, построенные от записей микросейсм в средней точке в X, Y направлениях /

Fig. 6. Fourier spectra built according tomicroseisms records at the midpoint in X, Y directions

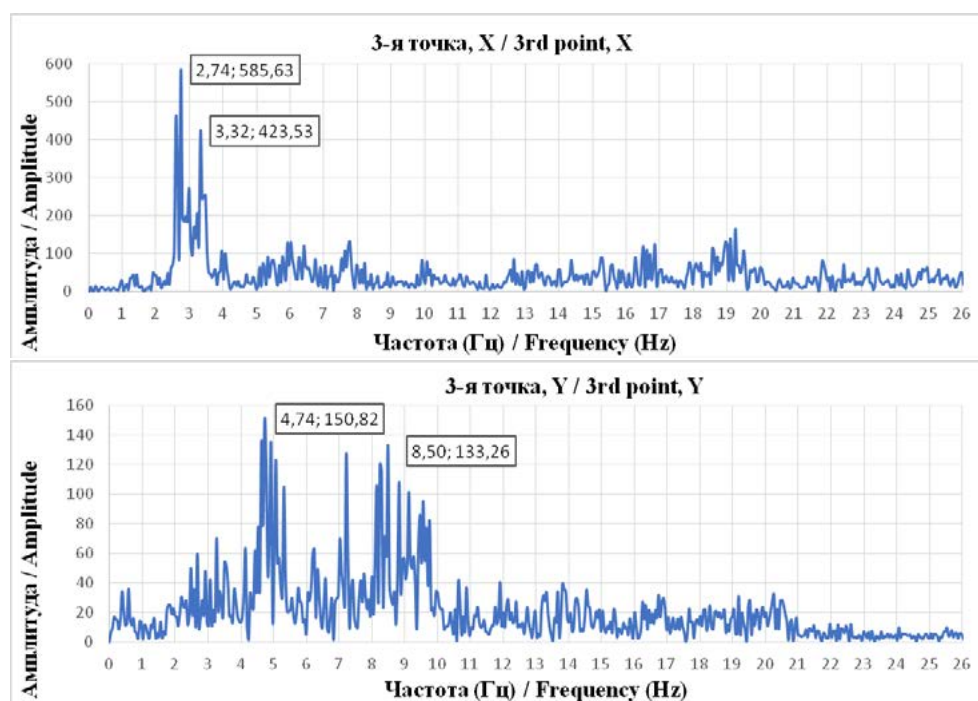


Рис. 7. Спектры Фурье, построенные от записей микросейсм в 3-й точке в X, Y направлениях /

Fig. 7. Fourier spectra built according tomicroseisms records at the 3rd point in X, Y directions

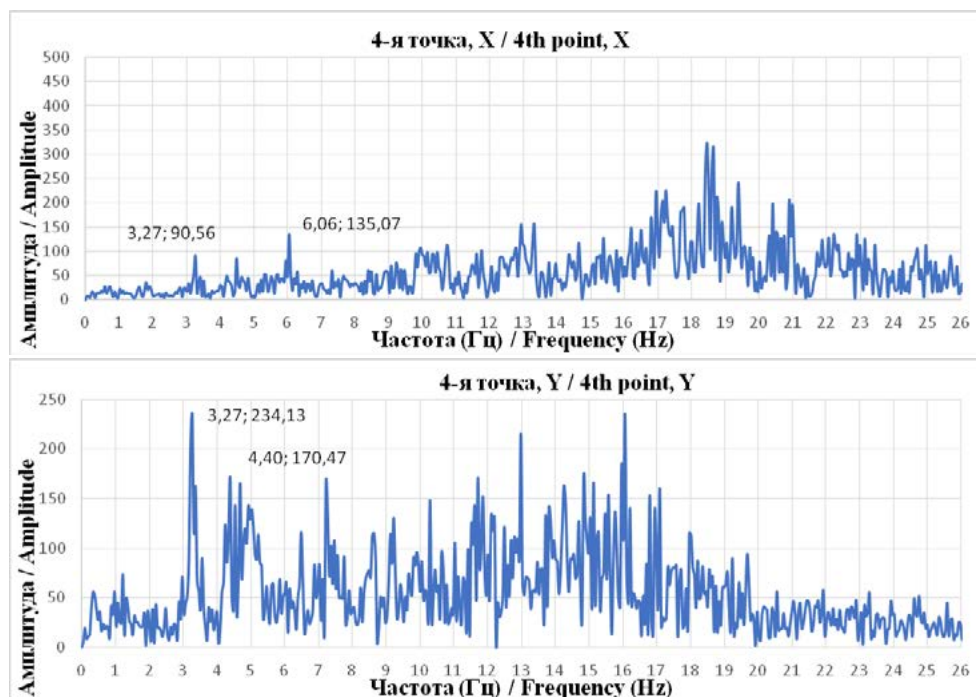


Рис. 8. Спектры Фурье, построенные от записей микросейсм в 4-й точке в X, Y направлениях /

Fig. 8. Fourier spectra built according tomicroseisms records at the 4th point in X, Y directions

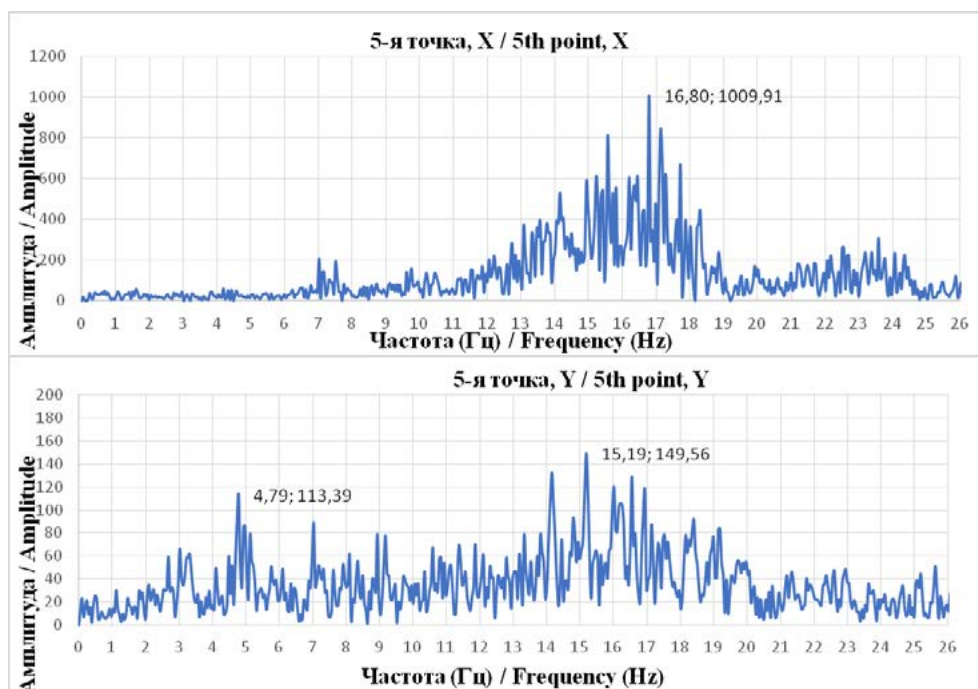


Рис. 9. Спектры Фурье, построенные от записей микросейсм в 5-й точке в X, Y направлениях /

Fig. 9. Fourier spectra built according tomicroseisms records at the 5th point in X, Y directions

ВЫВОДЫ

Наблюдения для исследуемого моста показали, что в разных точках проявляются различные преобладающие частоты колебаний, но есть основной тон частот, который во всех точках выражается, в частности, в поперечном направлении моста

(Х) в среднем равный **3,3 Гц** (период – **0,303 с.**), а в продольном направлении (У) в среднем – **4,9 Гц** (период – **0,204 с.**). В середине моста, то есть, наверху арки наблюдаются такие же частоты, но с ярко выраженным пиком спектра и, собственно, большим значением амплитуды, особенно в поперечном направлении (Х).

5-я точка измерения находится на крайней опоре, что в свою очередь является огромным массивом, расположенным на грунте. Частоты в этой точке получились в поперечном направлении моста (Х) **16,8 Гц** (период – **0,06 с.**), а в продольном направлении (У) – **15,2 Гц** (период – **0,066 с.**), что ближе к частотам грунта основания опоры.

Колебания грунта происходили с частотой **15,4 Гц** (период – **0,065 с.**) в поперечном направлении (Х) и **16,8 Гц** (период – **0,06 с.**) в продольном направлении (У), что характерно для базальтовых грунтов.

В результате выяснилось, что приобретенные новые величины частот микросейсмических колебаний моста в поперечном и продольном направлениях почти равны полученным в работе [Карапетян, 1967] старым экспериментальным соответственным значениям частот.

Литература

1. Акопян Т.Х. Очерк истории Еревана. – Ереван: Изд-во Ереванского университета, 1977. – 492 с.
2. Аносов Г.И. и др. Исследование сейсмической устойчивости общественно важных зданий города Калининграда. // «Казанская наука» Сборник научных статей. – 2010. – №9(2). – С. 561–566.
3. Арутюнян В.М., Оганесян К.Л. Архитектура Советской Армении: Краткий очерк. – Ереван: Изд-во Акад. наук Арм. ССР, 1955. – 296 с.
4. Еманов А.Ф., Скляров Л.А. Технология диагностики и мониторинга состояния строительных конструкций на основе исследования микросейсмических колебаний. // О регистрации средства массовой информации: «Предотвращение аварий зданий и сооружений». Алтае-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. Карапетян Б.К. Колебание сооружений возведенных в Армении. – Ереван: Изд. «Айастан», 1967. – 170 с.
7. 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). – С. 103–114. DOI: 10.46698/VNC.2021.70.17.009.
8. Оганесян С.М. К вопросу о построении новой теории сейсмостойкости. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружения. – 2013. – №5. – С. 26–29.
9. 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.
10. Хачиян Э.Е. Сейсмические воздействия и прогноз поведения сооружений. – Ереван: Изд. «Гитутюн» НАН РА, 2015. – 555 с.
11. Юдахин Ф.Н. Микросейсмические колебания – важный источник информации. // Вестник Уральского отделения РАН. – 2010. – №3. – С. 65–73.
12. Ditommaso R., Mucciarelli M., Parolai S., Picozzi M. Monitoring the structural dynamic response of a masonry tower: comparing classical and time frequency analyses. // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2012. – 23 p. DOI: 10.1007/s10518-012-9347-x.

13. 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.
14. 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.
15. Karapetyan J.K., Li Li, Comprehensive Studies of Seismic Forecast and Seismic Hazard Assessment in Armenia, Current State and Prospects. // *Acta Geologica Sinica (English Edition)*. – 2021. – Vol. 95(supp. 1). – pp. 55–58.
16. 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. // *10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering, Anchorage*. – 2014.
17. 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.
18. 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.
19. Nakamura Y. On The H/V Spectrum. // *The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17. – Beijing*. – 2008.
20. Nakamura Y. Seismic Vulnerability Indices for Ground and Structures Using Microtremor. // *World Congress on Railway Research. – Florence: 1997*. – pp. 1–7.
21. 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. Akopyan T.Kh. Essay on the history of Yerevan. Yerevan. Yerevan University. 1977. 492 p. (In Russ.)
2. Anosov G.I., Drobiz M.V., Zinoviev V.N. et al. Research of seismic stability of socially important buildings of the city of Kaliningrad. “Kazan Science” digest. 2010. Vol. 9. No. 2. pp. 561–566. (In Russ.)
3. Arutyunyan V.M., Oganessian K.L. Architecture of Soviet Armenia: A Brief Essay. Yerevan: Acad. Sciences Arm. SSR. 1955. 296 p. (In Russ.)
4. Emanov A.F., Sklyarov L.A. Technology for diagnosing and monitoring the state of building structures based on the study of microseismic vibrations. The registration of the mass media, Prevention of accidents in buildings and structures. 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. DOI: 10.23671/VNC.2016.2.20804. (In Russ.)
6. Karapetyan B.K. Vibration of structures erected in Armenia. Yerevan. Hayastan. 1967. 170 p. (In Russ.)
7. Karapetyan J.K., Hayrapetyan O.Yu., Matevosyan G.M., Karapetyan R.K. Comparative analysis of the dynamic characteristics of various types of buildings during microseismic vibrations. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 103–114. DOI: 10.46698/VNC.2021.70.17.009. (In Russ.)
8. Oganessian S.M. About a new theory of seismic resistance. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2013. No. 5. pp. 26–29. (In Russ.)

9. Savin S.N., Sitnikov I.V., Danilov I.L. Modern methods of technical diagnostics and monitoring as a means of safety of building structures. In the world of non-destructive testing. Saint Petersburg. Sven. 2008. pp. 14–18. (In Russ.)
10. Khachiyani E.E. Seismic effects and prediction of the behavior of structures. Yerevan. Gitutyun. NAS RA. 2015. 555 p. (In Russ.)
11. Yudakhin F.N. Microseismic vibrations are an important source of information. Bulletin of the Ural Branch of RAS. 2010. No. 3. pp. 65–73. (In Russ.)
12. Ditommaso R., Mucciarelli M., Parolai S., Picozzi M. Monitoring the structural dynamic response of a masonry tower: comparing classical and time frequency analyses. Bulletin of Earthquake Engineering. 2012. 23 p. DOI: 10.1007/s10518-012-9347-x.
13. 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.
14. 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.
15. Karapetyan J.K., Li Li, Comprehensive Studies of Seismic Forecast and Seismic Hazard Assessment in Armenia, Current State and Prospects. Acta Geologica Sinica (English Edition). 2021. Vol. 95. supp. 1. pp. 55–58.
16. 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. 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering, Anchorage. 2014.
17. 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.
18. Mucciarelli M., Gallipoli M.R., 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.
19. Nakamura Y. On The H/V Spectrum. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17. Beijing. 2008.
20. Nakamura Y. Seismic Vulnerability Indices for Ground and Structures Using Microtremor. World Congress on Railway Research. Florence. 1997. pp.1–7.
21. 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.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

УДК 550.8.08

DOI: [10.46698/VNC.2022.70.64.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.70.64.006)

Оригинальная статья

Изучение динамики ширины трещины потенциально обвального скального массива струнным датчиком на горе Гуниб (Дагестан)

Ш.Г. Идармачев , В.И. Черкашин , И.А. Алиев , И.Ш. Идармачев 

Институт геологии Дагестанского федерального исследовательского центра Российской Академии наук, Россия, 367030, Республика Дагестан, Махачкала, ул. Ярагского, д. 75,
e-mail: idarmachev46@mail.ru

Статья поступила: 30.03.2022, доработана: 27.04.2022, принята к публикации: 12.05.2022

Резюме: Актуальность работы. Изучение обвальных геологических процессов на Кавказе является важной проблемой обеспечения безопасности высокогорных населенных пунктов. Для этого применяются различные методы: аэрокосмические, палеогеографические, геоморфологические и др. Отдельным пунктом стоит вопрос геофизического мониторинга неустойчивых массивов в местах расположения населенных пунктов, линий электропередач и других объектов народно-хозяйственного значения. Поэтому **целью работы** является изучение динамики ширины трещины, связанной с неустойчивым состоянием скального массива, представляющего опасность обрушения на населенный пункт Гуниб с координатами 42.40° с.ш., 46.94° в.д. Данный массив представляет собой вертикальный блок размером 20х50х60 м, отделенный от основной части горы. На вершине массива ширина трещины между целиком и оторванным блоком составляет около 2 м. Для геофизического мониторинга был использован новый **метод** инструментального измерения ширины трещины. Разработка состоит из датчика линейного изменения длины с циферблатным регистратором, вольфрамовой проволоки, закрепленной на противоположных торцах трещины отрыва неустойчивого скального массива от цельной части. Преимуществом данного инструмента, по сравнению с электронными устройствами, является отсутствие источника питания, дрейфа нуля, простота конструкции. Данная установка может быть рекомендована для практического применения.

Результаты работы. На основе мониторинга исследована динамика изменения ширины трещины скального массива в течение полутора лет. Установлена зависимость ширины трещины от сезонной годовой температуры атмосферы с отрицательным коэффициентом корреляции 0,78. Максимальная амплитуда изменения ширины трещины за период 365 сут с 18.08.2020 по 18.08.2021 составила 4570 мкм. Установлено, что атмосферные осадки не оказывают прямого влияния на деформационный процесс скального массива. Однако не исключается возможность их влияния спустя некоторое время, которое необходимо для просачивания дождевой воды в основание исследуемого массива. Увлажнение прослойки глинистых пород, лежащих в основании толщи известняков, может привести к деформации глин, в результате чего возможно оседание массива или подвижка по направлению уклона пласта в сторону обрыва. Обратимый характер изменения ширины трещины за годовой период наблюдений, а также отсутствие тренда в ряде данных измерений за весь период наблюдений позволяет полагать, что скальный массив на данном этапе не испытывает динамику, связанную с наклоном в сторону его предполагаемого падения. Однако на графике в отдельные периоды наблюдаются скачкообразные изменения большой амплитуды 1500–2500 мкм, природу которых предстоит еще выяснить. Это предполагает проведение дальнейших исследований, например, наклонометрических и сейсмометрических.

Ключевые слова: микросейсмы, землетрясения, стоячие океанические волны, волны Лява и Релея, модулированные колебания, струнный датчик, коэффициент температурного расширения, наклономер.

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию ФГБУН Института геологии ДФИЦ РАН, код: FMSW-2022-0026.

Для цитирования: Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Алиев И.А., Идармачев И.Ш. Изучение динамики ширины трещины потенциально обвального скального массива струнным датчиком на горе Гуниб (Дагестан). *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12(2): 78-88. DOI: 10.46698/VNC.2022.70.64.006.

GEOPHYSICAL METHODS

[DOI: 10.46698/VNC.2022.70.64.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.70.64.006)

Original paper

Studying the dynamics of the crack width of a potentially collapsing rock massif with a string sensor on Mount Gunib (Dagestan)

Sh.G. Idarmachev^{ID}, V.I. Cherkashin^{ID}, I.A. Aliev^{ID}, I.Sh. Idarmachev^{ID}

Institute of Geology of the Dagestan Federal research center of the Russian Academy of Sciences, 75 Yaragskogo Str., Makhachkala 367030, Russian Federation, e-mail: idarmachev46@mail.ru

Received: 30.03.2022, revised: 27.04.2022, accepted: 12.05.2022

Summary: Relevance. The study of landslide geological processes in the Caucasus is an important problem of ensuring the safety of high-altitude settlements. Various methods are used for this: aerospace, paleogeographic, geomorphological, etc. A separate point is the issue of geophysical monitoring of unstable massifs in the locations of settlements, power lines and other objects of national economic importance. Therefore, **the aim** of the work is to study the dynamics of the crack width associated with the unstable state of the rock massif, which poses a danger of collapse on the settlement of Gunib with coordinates 42.40° S.W., 46.94° V.D. This massif is a vertical block measuring 20x50x60 m, separated from the main part of the mountain. At the top of the array, the width of the crack between the whole and the detached block is about 2 m. A new **method** of instrumental measurement of the crack width was used for geophysical monitoring. The development consists of a linear length change sensor with a dial recorder, a tungsten wire fixed at opposite ends of a crack in the separation of an unstable rock mass from a solid part. The advantage of this tool, in comparison with electronic devices, is the absence of a power source, zero drift, and simplicity of design. This installation can be recommended for practical use. **Results.** On the basis of monitoring, the dynamics of changes in the width of a crack in a rock massif over a year and a half has been studied. The dependence of the crack width on the seasonal annual atmospheric temperature with a negative correlation coefficient of 0.78 has been established. The maximum amplitude of the crack width change over the seasonal period of 365 days from 08/18/2020 to 08/18/2021 was 4570 microns. It is established that atmospheric precipitation does not have a direct effect on the deformation process of the rock mass. However, the possibility of their influence after some time, which is necessary for rainwater to seep into the base of the studied massif, is not excluded. Moistening of the layer of clay rocks underlying the limestone strata can lead to deformation of clays, resulting in possible subsidence of the massif or movement in the direction of the slope of the formation towards the cliff. The reversible nature of the change in the crack width over the annual observation period, as well as the absence of a trend in a number of measurement data for the entire observation period, suggests that the rock mass at this stage does not experience dynamics associated with a slope towards its expected fall. However, in some periods, the graph shows abrupt changes of a large amplitude of 1500-2500 microns, the nature of which remains to be determined. This implies further research, for example, tilt and seismometric.

Keywords: microseisms, earthquakes, standing ocean waves, Love and Rayleigh waves, modulated oscillations, string sensor, coefficient of thermal expansion, tilt meter.

Acknowledgements: The work was carried out according to the state task of the Institute of Geology of the DFIZ RAS, code: FMSW-2022-0026.

For citation: Idarmachev Sh.G., Cherkashin V.I., Aliyev I.A., Idarmachev I.Sh. Studying the dynamics of the crack width of a potentially collapsing rock massif with a string sensor on Mount Gunib (Dagestan). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12(2): 78-88. DOI: 10.46698/VNC.2022.70.64.006.

Введение

Обвальные процессы больших скальных массивов на крутых склонах играют доминирующую роль в долгосрочных процессах формирования ландшафтов и, являясь опасными геологическими процессами, представляют угрозу жизнедеятельности людей и объектам инфраструктуры [Попов и др., 2021; Бондырев и др., 2014]. Классический подход к исследованию обвальных процессов – это изучение их механизмов разрушения [Frayssines, Hantz, 2006], условий окружающей среды до и после события [D’Amato et al., 2016] и долгосрочный геофизический мониторинг с помощью дистанционного зондирования радарными, тахеометрами, точечных измерений смещения щелемерами и другими датчиками [Di Maio et al., 2010; Dixon et al., 2018; Levy et al., 2010; Walter et al., 2020; Заалишвили и др., 2013]. Используются также сейсмические методы исследования [Зайцев, Костюков, 2012; Рагозин, Федотов, 2012; Welch, 1967; Nakamura, 1989; Weber et al., 2018; Идармачев и др., 2021]. В частности, согласно авторам [Dietze, 2019; Dietze et al., 2021] циклическая сейсмическая активность скального массива проявляется для суточных и недельных временных интервалов в основном на низких частотах 1–2 Гц. Авторами [Bottelin et al., 2013] было обнаружено изменение частоты колебаний, связанное с температурным режимом скального массива. С повышением температуры происходит снижение частоты колебаний с временной задержкой в несколько месяцев из-за уменьшения модуля Юнга.

К сожалению, ни один из этих подходов не может обеспечить достоверное представление о процессах разрушения горных пород с высоким временным разрешением, за которым следует неминуемый обвал. Трудности при определении критического состояния обвального процесса представляют также триггерные процессы воздействия сильных землетрясений, колебания, вызванные силой ветра. Оказывают свое влияние изменение сезонной температуры, осадки, периоды переходов от заморозков к таянию снежного покрова и др. [Stock et al., 2013]. Кроме этого, внешними факторами триггерного воздействия могут служить сильные землетрясения, произошедшие на удалении более 1000 км [Sobolev, Zakrzhevskaya, 2013; Nikolaev A.V., Nikolaev V.A., 1993], способствующие возникновению поверхностных волн Релея и Лява с периодами колебаний от нескольких секунд до нескольких десятков секунд [Дубянский и др., 2005]. Поверхностные волны вызывают раскачку высотных зданий амплитудой до 0,5 м, а также провоцируют оползни, обвалы на горных склонах, возникновение трещин в грунтах, обрывы телефонных и электрических линий и нарушения инфраструктуры.

Объектом исследований является неустойчивый скальный массив, расположенный над населенным пунктом Гуниб (Дагестан) (координаты: 42.40° с.ш.; 46.94° в.д.), представляющий опасность для жителей поселения (рис. 1). Этот участок представляет собой вертикальный блок размером 20'50'60 м, отделенный от основной части массива, лежащий на слое алевролитистой глины мощностью до 1 м. Скальный массив вместе с глинистой подложкой наклонен под углом 40° в сторону обрыва. На вершине массива ширина трещины между целиком и оторванным

блоком составляет около 2 м. Учитывая, что прочность на сжатие и сдвиг у глин ниже, чем у известняков, перемещение твердой части толщи горных пород должно происходить в сторону уклона по глинистой прослойке. В результате чего в вышележащем слое образуются вертикальные трещины отрыва, что предопределяет возможность обрушения.

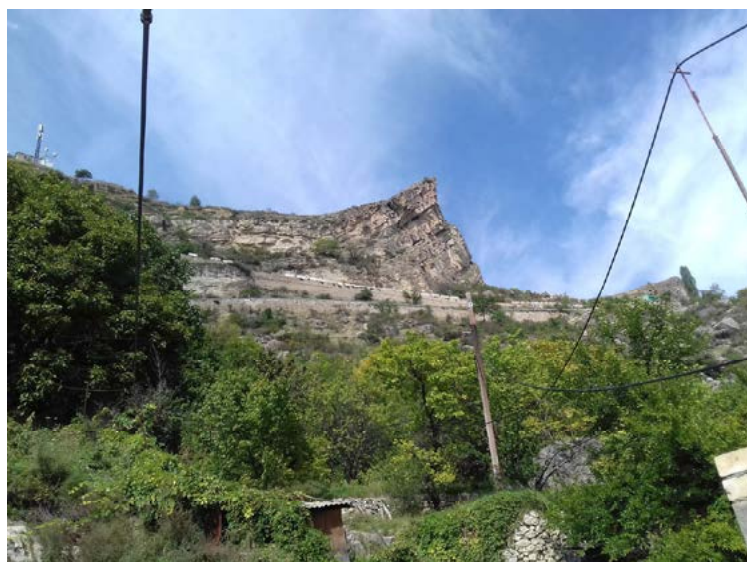


Рис. 1. Фото потенциально обвального массива над Гунибом /

Fig. 1. Photo of a potentially collapsing massif over Gunib

По просьбе администрации поселения в 2020 г. на скальном массиве проводились сейсмометрические наблюдения для регистрации подвижек и колебаний с помощью цифровой установки, состоящей из сейсмометра, операционного усилителя, встроенного в его корпус, и аналого-цифрового преобразователя (АЦП), сопряженного с ноутбуком [Идармачев и др., 2021]. Были изучены кинематические параметры скального массива, находящегося в условиях неустойчивого равновесия, от различного рода внешних воздействий. Было установлено, что микросейсмы штормовых циклонов в океане с периодом 14-15 с вызывают возникновение модулированных собственных колебаний массива с периодом 0,87 с максимальной амплитудой 0,8 мкм.

Кроме этого, за небольшой период сейсмометрических наблюдений было зарегистрировано несколько землетрясений магнитудами $M=3,0-3,6$, произошедших на Главном Кавказском хребте. Эпицентры землетрясений находились от Гуниба на расстояниях 35–45 км. Запись одного из них, произошедшего 15.09.2020 г. с координатами эпицентра: 42.39° с.ш., 46.49° в.д., приведена на рисунке 2.



Рис. 2. Сейсмограмма землетрясения 15.09.2020 г. /

Fig. 2. Seismogram of the earthquake of 15.09.2020

На сейсмограмме выделяются две волны, вначале проявляется продольная V_p продолжительностью 12 с с максимальной амплитудой 12,6 мкм и затем – поперечная V_s с большей амплитудой 57 мкм и продолжительностью 20 с. Периоды колебаний обеих волн находятся в пределах $T=1,8-2,2$ с. Сравнение периодов колебаний землетрясения и собственных колебаний скалы ($T=0,87$ с) показывает, что они не совпадают по фазе. Поэтому на записи землетрясения нет аномальных резонансных колебаний, связанных с частотой собственных колебаний.

Внешними факторами триггерного воздействия могут служить колебания не только от сильных близких землетрясений, но и удаленных магнитудами $M=9$, которые могут спровоцировать обвальные процессы в массивах горных пород, находящихся в условиях неустойчивого равновесия.

Методы исследования линейной деформации массива

К сожалению, проводить длительные наблюдения с помощью электронных систем не представляется возможным из-за воздействия на аппаратуру различного рода климатических явлений (дождь, гроза и др.). Ярким примером является работа серии телеметрических станций в 2020 г., установленных на горе Хохфогель в австрийских Альпах. Аппаратура вышла из строя в результате грозовой молнии через 44 дня. Установленный нами электронный двухкоординатный наклономер на горе Гуниб, также вышел из строя от грозовой молнии. Учитывая сложившуюся ситуацию, нами был разработан струнный механический датчик собственной конструкции, позволяющий вести измерения ширины трещины с высокой точностью.

Струнный датчик состоит из вольфрамовой проволоки диаметром 0,3 мм, закрепленной на обеих сторонах трещины. В исследуемом месте ширина трещины составляет 197,8 см. Один конец проволоки закреплен на подвижной части измерительного устройства с циферблатом линейного перемещения марки NEUTER (рис. 3). Натяжение проволоки обеспечивается пружиной. Точность измерения длины составляет 0,01 мм или 10 мкм. Измерительное устройство имеет кожух для защиты от воздействия солнца и дождя. Одновременно измеряется температура атмосферного воздуха градусником, с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$. На рисунке 4 приведены совмещенные графики изменения замеров, полученных струнным датчиком, и температуры воздуха за период наблюдений 18.07.2020 г.–16.01.2022 г.



Рис. 3. Фото струнного измерителя ширины трещины /

Fig. 3. Photo of a string crack width meter

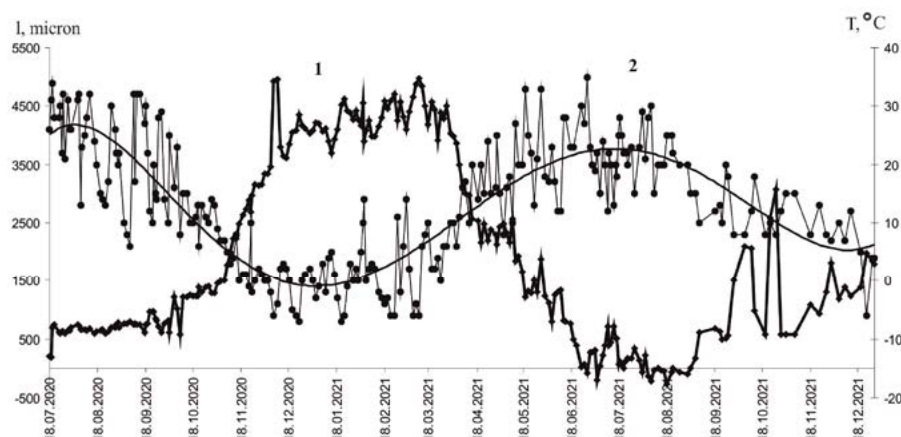


Рис. 4. Графики изменения ширины трещины скального массива над Гунибом струнным датчиком (1) и температуры атмосферы (2) /

Fig. 4. Graphs of changes in the crack width of the rock mass above the Gunib string sensor (1) and atmospheric temperature (2)

Результаты работы и их обсуждение

Анализ графика (1) показывает, что он имеет сезонный ход обратный по фазе относительно графика температуры атмосферного воздуха (2). Коэффициент корреляции между ними для всего периода наблюдений равен $K=-0,78$. С понижением температуры, начиная с октября 2020 г. по март 2021 г., наблюдается расширение трещины, а с повышением температуры с марта по июнь 2021 г. происходит ее сжатие. На относительно коротких интервалах 12–15 суток в июле-августе 2020 г. изменение температуры не оказывает особого влияния. Короткие вариации температуры в пределах 15–25°C вызывают изменение ширины трещины величиной не более 4% от максимального сезонного значения (4570 мкм). Из чего следует, что на ширину трещины оказывает влияние сезонный ход температуры атмосферного воздуха. Некоторая временная задержка экстремальных значений ширины трещины от температуры атмосферы, примерно на 2 месяца, указывает на физически обоснованную связь между ними, то есть, для прогрева и остывания скального массива требуется определенное время.

Можно предположить, что фазы ускорения деформаций и их циклические этапы могут быть связаны с осадками в Гунибском районе. Для сравнения в таблице показано месячное количество осадков в 2020 и 2021 гг. по данным местной метеостанции.

Таблица 1 / Table 1

**Количество осадков в месяц в Гунибе за 2020 и 2021 гг. /
Monthly precipitation in Guniba for 2020 and 2021**

2020 г.							2021 г.	
Июнь / June	Июль / July	Август / August	Сентябрь / September	Октябрь / October	Ноябрь / November	Декабрь / December	Январь / January	Февраль 1–14 / February 1-14
41 мм	103 мм	120 мм	48 мм	6 мм	21 мм	8 мм	23 мм	12 мм

Максимальное количество осадков выпало в июле, августе 2020 г., а ускорение деформации скального массива наблюдается в ноябре и декабре 2020 г., при этом количество осадков выпало в разы меньше, чем в июле-августе. Из этого следует, что атмосферные осадки не оказывают прямого влияния на деформационный процесс скального массива. Однако не исключается возможность их влияния спустя некоторое время, которое необходимо для просачивания дождевой воды в основание массива с глинистой прослойкой. Увлажнение глинистых пород может привести к деформации прослойки, оседанию массива или подвижке по направлению уклона пласта. В этом случае график ширины трещины должен испытывать тренд, указывающий на процесс необратимой деформации, связанный с оседанием или наклоном. Расчет уравнения регрессии для данных всего ряда ширины трещины ($y = -1,37x$) показывает ее уменьшение. Однако уравнение с отрицательным знаком может быть ошибочным из-за небольшого периода наблюдений, менее чем полтора года. В случае оседания или расширения трещины знак уравнения должен быть положительным. Из данного анализа следует, что основным фактором, оказывающим влияние на динамику ширины трещины, является деформация скальных массивов, как цельного, так и отделенного от него, в зависимости от сезонной температуры атмосферы.

Температура атмосферы может также влиять на физические характеристики самого струнного датчика. При этом следует учесть, что температура струны будет меняться практически синхронно с температурой атмосферы. Для этого оценим изменение длины струны датчика за короткий период наблюдений с 27.08.2020 по 08.09.2020, при котором амплитуда изменения температуры атмосферы составила 24°C . Для расчета использовалась формула теплового расширения металлов [Кухлинг, 1985]:

$$\Delta l = \alpha l \Delta T \quad (1)$$

где Δl – линейное расширение металла;

α – температурный коэффициент;

ΔT – разность температур тела.

Подставляя численные значения $\alpha = 4,3 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ для вольфрама, $\Delta T = 24^{\circ}\text{C}$ и длины струны $l = 198 \times 10^4$ мкм в (1) получаем $\Delta l = 204$ мкм. По данным полевых измерений «увеличение» ширины трещины за этот период в результате понижения температуры составило $\Delta l = 100$ мкм. Данное расчетное тепловое изменение длины струны составляет менее 4% от максимальной амплитуды измеренного расширения трещины за весь период наблюдений.

Также по формуле (1) были сделаны численные оценки температурного расширения скалы. Для этого были взяты следующие численные значения: $\alpha = 8 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ – температурный коэффициент известняка [Петрунин, Попов, 2011]; $l = 20 \times 10^6$ мкм – поперечная ширина скального массива; $\Delta T = 45^{\circ}\text{C}$ – максимальная амплитуда сезонной температуры. Подставляя их в (1), имеем $\Delta l = 7200$ мкм. Если иметь в виду, что скальный массив расширяется в обе стороны равномерно, то изменение ширины трещины составит только половину Δl , то есть – 3200 мкм. Из этих оценок следует, что тепловое расширение массива может существенно исказить данные измерения ширины трещины, связанные с наклоном скалы.

Выводы

1. Проведено испытание механического струнного датчика линейного перемещения для измерения динамики ширины трещины потенциального обвального скального массива на горе Гуниб. Погрешность измерений не превышает 10 мкм или 10^{-5} м. Преимуществом данного инструмента является отсутствие источника питания, дрейфа нуля, простота конструкции по сравнению с электронными устройствами. Данная установка может быть использована для практического применения. При необходимости в устройстве может быть предусмотрена возможность установки звуковой, световой сигнализации, а также передачи сигнала тревоги по сотовой связи.

2. На основе мониторинга ширины отрывной трещины скального массива исследована ее динамика в течение полутора лет. Установлена зависимость ширины трещины от сезонной годовой температуры атмосферы с отрицательным коэффициентом корреляции 0,78. Максимальная амплитуда изменения ширины трещины за период 365 сут с 18.08.2020 по 18.08.2021 составила 4570 мкм.

3. Обратимый характер изменения ширины трещины за годовой период наблюдений, а также отсутствие тренда в ряде данных измерений за весь период наблюдений позволяет полагать, что скальный массив на данном этапе не испытывает динамику, связанную с наклоном в сторону его предполагаемого падения. Однако на графике в отдельные периоды наблюдаются скачкообразные изменения большой амплитуды 1500–2500 мкм, природу которых предстоит еще выяснить. Это предполагает проведение дальнейших исследований, например, наклонметрических и сейсмометрических.

Литература

1. Бондырев И.В., Церетели З.Д., Али Узун, Заалишвили В.Б. Оползни Южного Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2014. – №4. – С. 105–123.
2. Дубянский А.И., Зайцев С.В., Силкин К.Ю. Поверхностные волны сейсмических событий в условиях Воронежского кристаллического массива. // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геофизика. – 2005. – №1. – С. 221–225.
3. Заалишвили В.Б., Невский Н.И., Невский Л.Н., Мельков Д.А., Дзеранов Б.В., Кануков А.С., Шепелев В.Д. Мониторинг опасных и техногенных процессов РСО-Алания. // Геология и геофизика Юга России. – 2013. – №1. – С. 17–27.
4. Зайцев А.С., Костюков Е.А. Инженерная сейсморазведка и сейсмометрия конструкций зданий и сооружений. // Инженерные изыскания. – 2012. – №11. – С. 16–19. ISSN1997-8650
5. Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Идармачев И.Ш. Сейсмометрический мониторинг неустойчивого скального массива в Гунибском районе Дагестана (Северный Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №2. – С. 74–86. DOI: 10.46698/VNC.2021.49.57.006
6. Кухлинг Х. Справочник по физике. – М.: Мир, 1985. – 250 с.
7. Петрунин Г.И., Попов В.Г. Теплофизические свойства вещества Земли. // Учебное пособие МГУ. – 2011. – 67 с.
8. Попов М.Г., Попова О.Г. Возможность комплексного изучения геологической среды при сейсмо-экологическом мониторинге в районах повышенной экологической опасности // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №2. – С. 152–166. DOI: 10.46698/VNC.2021.49.57.006
9. Рагозин Н.А., Федотов А.С. Возможности обработки многоканальных сейсморазведочных данных. // Инженерные изыскания. – 2012. – № 11. – С. 29–34. ISSN1997-8650

10. Bottelin P., Levi C., Baillet L., Jongmans D., Gueguen P. Modal and thermal analysis of les arches unstable rock column (vercors massif, french alps). // *Geophysical Journal International*. – 2013. – Vol. 194. – pp. 849–858. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt046>
11. Dietze M. Grain-size distribution unmixing using the package emmango. // *Quaternary Science Journal*. – 2019. – Vol. 68(1). – pp. 29-46.
12. Dietze M., Krautblatter N., Illien L., Hovius N. Seismic constraints on rock damaging related to a failing mountain peak: the Hochvogel, Allgau. // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 2021. – Vol. 46. No.2. – pp. 417–429. DOI:10.1002/esp.5034
13. Dixon N., Smith A., Flint J.A., Kyanna R., Clark B., Andjelkovich M. An acoustic emission landslide early warning system for communities in low-income and middle-income countries. // *Landslides* 15. – 2018. – pp. 1631-1644.
14. Di Maio C., Vassallo R., Pascale S., Sdao F. Structure and kinematics of a landslide in a complex clayey formation of the Italian southern Apennines. // *Engineering Geology*. – 2010. – Vol. 116(3). – pp. 311-322.
15. D'Amato J., Hantz D., Jaboyedoff M., Baillet L., Mariscal A. Influence of meteorological factors on rockfall occurrence in a middle mountain limestone cliff. // *Natural Hazards and earth system Sciences*. – 2016. – Vol. 16(3). – pp. 719-735. DOI:10.5194/nhes-16-719-2016
16. Frayssines M., Hantz D. Failure mechanisms and triggering in calcareous cliffs of the subalpine ranges (French alps). // *Engineering Geology*. – 2006. – Vol. 86. – pp. 256-270. DOI:10.1016/j.enggeo.2006.05.009
17. Levy C., Baillet L., Jongmans D., Mourot P., Hantz D. Dynamic response of the chamousset rock column (western alps, france). // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. – 2010. – Vol. 115(F4). – pp. 40-43. DOI:10.1029/2009/JF001606
18. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimations subsurface using microtremors on the ground surface. // *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*. – 1989. – Vol. 30. – pp. 25-33.
19. Nikolaev A.V., Nikolaev V.A. Earth tides triggering of Continental Earthquakes. // *Seismological Press. Beijing*. – 1993. – pp. 319–327.
20. Sobolev G.A., Zakrzhevskaya N.A. On the question of influence of remote earthquakes on seismicity. // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 2013. – Vol. 49. No.4. – pp. 474–487.
21. Stock G.M., Collins B.D., Santaniello D.J., Zimmer V.L., Wiczorek G.F., Snyder J.B. Historical rock falls in Yosemite national park. // *U.S. Geophysical Survey Data Series*. – 2013. – Vol. 746. – p. 17.
22. Walter F., Amann S., Kos A., Kenner R., Phillips M., de Preux A., Huss M., Tognacca C., Clinton J., Diehl T., Bonaomi Y. Direct observations of a three million cubic meter rock-slope collapse with almost immediate initiation of ensuing debris flows. // *Geomorphology*. – 2020. – Vol. 351. – pp. 106933.
23. Weber S., Fah D., Beutel J., Faillettaz J., Gruber S., Vieli A. Ambient seismic vibrations in steep bedrock permafrost used to infer variations of ice-fill in fractures. // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2020. – Vol. 501. – pp. 119–127.
24. Welch P.D. The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. // *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. – 1967.

References

1. Bondyrev I.V., Tsereteli E.D., Uzun Ali, Zaalishvili V.B. Landslides of the Southern Caucasus. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2014. No.4. pp. 105–123. (In Russ.)
2. Dubyansky A.I., Zaitsev S.V., Silkin K.Yu. Surface waves of seismic events in the conditions of the Voronezh crystalline massif. In: *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2005. No.1. pp. 221–225. (In Russ.)

3. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Nevsky L.N., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Kanukov A.S., Shepelev V.D. Monitoring of hazardous natural and technogenic processes on the territory of RNO-Alania. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2013. No.1. pp. 17–27. (In Russ.)
4. Zaitsev A.S., Kostyukov E.A. Engineering seismics and seismometry of constructions of buildings and structures. *Engineering survey*. 2012. No. 11. pp. 16–19. (In Russ.)
5. Idarmachev Sh.G., Cherkashin V.I., Idarmachev I.Sh. Seismometric monitoring of an unstable rock mass in the Gunib region of Dagestan (Northern Caucasus). *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 74–86. DOI: 10.46698/VNC.2021.49.57.006. (In Russ.)
6. Kuhlning H. Reference-book on physics. Moscow. Mir, 1985. 250 p. (In Russ.)
7. Petrulin G.I., Popov V.G. Thermophysical properties of the matter of the Earth. Reference-book of Moscow State University. 2011. 67 p. (In Russ.)
8. Popov M.G., Popova O.V. The possibility of complex studying for the geological environment during seismic-ecological monitoring in areas of increased environmental danger. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2021. Vol. 11. No.2. pp. 152–166. DOI: 10.46698/VNC.2021.49.57.006 (In Russ.)
9. Ragozin N.A., Fedotov A.S. Possibilities of multichannel seismic prospecting data processing. *Engineering survey*. 2012. No. 11. pp. 29–34. (In Russ.)
10. Bottelin P., Levi C., Baillet L., Jongmans D., Gueguen P. Modal and thermal analysis of les arches unstable rock column (vercors massif, french alps). *Geophysical Journal International*. 2013. Vol. 194. pp. 849–858. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt046>
11. Dietze M. Grain-size distribution unmixing using the package emmangeo. *Quaternary Science Journal*. 2019. Vol. 68. Issue 1. pp. 29–46.
12. Dietze M., Krautblatter N., Illien L., Hovius N. Seismic constraints on rock damaging related to a failing mountain peak: the Hochvogel, Allgau. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2021. Vol. 46. No.2. pp. 417–429. DOI: 10.1002/esp.5034.
13. Dixon N., Smith A., Flint J.A., Kyanna R., Clark B., Andjelkovich M. An acoustic emission landslide early warning system for communities in low-income and middle-income countries. *Landslides* 15. 2018. pp. 1631–1644.
14. Di Maio C., Vassallo R., Pascale S., Sdao F. Structure and kinematics of a landslide in a complex clayey formation of the Italian southern Apennines. *Engineering Geology*. 2010. Vol. 116. Issue 3. pp. 311–322.
15. D'Amato J., Hantz D., Jaboyedoff M., Baillet L., Mariscal A. Influence of meteorological factors on rockfall occurrence in a middle mountain limestone cliff. *Natural Hazards and earth system Sciences*. 2016. Vol. 16. Issue 3. pp. 719–735. DOI: 10.5194/nhes-16-719-2016.
16. Frayssines M., Hantz D. Failure mechanisms and triggering in calcareous cliffs of the sub-alpine ranges (French Alps). *Engineering Geology*. 2006. Vol. 86. pp. 256–270. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.05.009.
17. Levy C., Baillet L., Jongmans D., Mourot P., Hantz D. Dynamic response of the Chamousset rock column (Western Alps, France). *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2010. Vol. 115. Issue F4. pp. 40–43. DOI: 10.1029/2009/JF001606.
18. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimations subsurface using micro-tremors on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*. 1989. Vol. 30. pp. 25–33.
19. Nikolaev A.V., Nikolaev V.A. Earth tides triggering of Continental Earthquakes. *Seismological Press. Beijing*. 1993. pp. 319–327.
20. Sobolev G.A., Zakrzhevskaya N.A. On the question of influence of remote earthquakes on seismicity. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2013. Vol. 49. No 4. pp. 474–487.
21. Stock G.M., Collins B.D., Santaniello D.J., Zimmer V.L., Wiczorek G.F., Snyder J.B. Historical rock falls in Yosemite national park. *U.S. Geophysical Survey Data Series*. 2013. Vol. 746. p. 17.

22. Walter F., Amann S., Kos A., Kenner R., Phillips M., de Preux A., Huss M., Tognacca C., Clinton J., Diehl T., Bonaomi Y. Direct observations of a three million cubic meter rock-slope collapse with almost immediate initiation of ensuing debris flows. *Geomorphology*. 2020. Vol. 351. pp. 106933.

23. Weber S., Fah D., Beutel J., Faillettaz J., Gruber S., Vieli A. Ambient seismic vibrations in steep bedrock permafrost used to infer variations of ice-fill in fractures. *Earth and Planetary Science Letters*. 2020. Vol. 501. pp. 119–127.

24. Welch P.D. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. 1967.

== ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ ==

УДК 669.21

DOI: [10.46698/VNC.2022.32.98.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.32.98.007)

Оригинальная статья

Комплексный анализ геолого-промышленных параметров Дороговского месторождения

И.И. Босиков¹, Р.В. Ключев², И.В. Силаев³

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

²Московский политехнический университет, Россия, 107203, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38, e-mail: kluev-roman@rambler.ru;

³Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова», Россия, 362025, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 44-46

Статья поступила: 08.04.2022, доработана: 13.05.2022, принята к публикации: 16.05.2022

Резюме: Актуальность работы. В статье рассматривается комплексный анализ геологической и геофизической информации по проводимым исследованиям с целью выделения перспективных участков для проведения дальнейших геологоразведочных работ. Впервые в конце XX века детальными геологоразведочными работами уточнено залегание пласта песчаника, его мощность, а также изучены данные для установления качества полезного слоя. Пласт песчаника представлен двумя пачками. Непосредственно в почве нижней пачки пласта на площади месторождения отмечены глинистые сланцы, мощность их, вскрытая буровыми скважинами, изменяется от 0,60 до 2,40 м. **Цель исследований.** Провести комплексный анализ и оценку перспективных зон Дороговского месторождения с применением современных ГИС-технологий. Исходным материалом для научно-исследовательской работы послужили результаты лабораторных исследований песчаника по 17 скважинам, пробуренным на площади Дороговского месторождения. Были исследованы 7 геолого-промышленных параметров: мощность вскрышных пород M_v , мощность полезного ископаемого M_{pi} , содержания SiO_2 , Al_2O_3 , $CaO + MgO$, TiO_2 , $Na_2O + K_2O$ по 17 пересечениям полезной толщи. **Методика исследований.** Для того, чтобы проследить распределение указанных параметров по площади, была использована следующая методика. Сначала были сняты условные координаты для каждой скважины, и составлена таблица показателей по пересечениям. Затем, на основании этих данных в программе Surfer построены карты изолиний методом «скользящего окна». **Результаты исследований.** По построенным картам распределения мощности вскрышных пород сделаны следующие выводы: минимальная мощность приурочена к центральной и северной частям участка, и возрастает на запад и юго-восток. Такое распределение учтено при разработке системы разведки – блоки высоких категорий А и В расположены именно в центральной части. Выполненный площадной анализ геолого-промышленных параметров исследуемого месторождения песчаников позволил установить следующие закономерности: наличие в центральной части месторождения достаточно мощной полезной толщи (более 10 м) с самыми незначительными значениями вскрышных пород (менее 1,0 м); центральная часть месторождения характеризуется повышенными значениями кремнезема SiO_2 , не очень большими содержаниями глинозема Al_2O_3 и компонентов, входящих в состав глинистых минералов. Таким образом, центральная зона Дороговского месторождения является по качеству песчаников, планируемых использоваться в качестве сырья для строительных работ, наиболее благоприятной.

Ключевые слова: месторождение, скважина, метод «скользящего окна», карты изолиний, песчаники, кондиции.

Для цитирования: Босиков И.И., Ключев Р.В., Силаев И.В. Комплексный анализ геолого-промышленных параметров Дороговского месторождения. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12(2): 89-102. DOI: [10.46698/VNC.2022.32.98.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.32.98.007).

DOI: [10.46698/VNC.2022.32.98.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.32.98.007)

Original paper

Comprehensive analysis and assessment of Prospective gold-ore zones using modern geophysical methods

I.I. Bosikov¹, R.V. Klyuev², I.V. Silaev³

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

²Moscow Polytechnic University, 38 Bolshaya Semenovskaya Str., Moscow 107203, Russian Federation, e-mail: kluev-roman@rambler.ru;

³North Ossetian State University named after K.L. Khetagurov, 44-46 Vatutina Str., Vladikavkaz 362025, Russian Federation

Received: 08.04.2022, revised: 13.05.2022, accepted: 16.05.2022

Abstract: Relevance. The article discusses a comprehensive analysis of geological and geophysical information on ongoing research in order to identify promising areas for further exploration. **Aim.** Conduct a comprehensive analysis and assessment of promising areas of the Dorogovskoye field using modern GIS technologies. For the first time at the end of the 20th century, detailed exploration work clarified the occurrence of the sandstone reservoir, its thickness, and studied the data to establish the quality of the useful layer. The sandstone layer is represented by two packs. Clay shales are noted directly in the soil of the lower unit of the reservoir on the deposit area, their thickness, uncovered by boreholes, varies from 0.60 to 2.40 m. **Methods.** In order to trace the distribution of these parameters over the area, the following method was used. First, conditional coordinates for each well were taken, and a table of indicators for intersections was compiled. Then, based on these data, contour maps were built in the Surfer program using the “sliding window” method. The source material for the research work was the results of laboratory studies of sandstone from 17 wells drilled in the area of the Dorogovskoye deposit. 7 geological and industrial parameters were studied: overburden thickness M_v , mineral thickness M_{pi} , content of SiO_2 , Al_2O_3 , $CaO + MgO$, TiO_2 , $Na_2O + K_2O$ at 17 intersections of useful strata. **Results.** According to the maps of overburden thickness distribution, the following conclusions were made: the minimum thickness is confined to the central and northern parts of the site, and increases to the west and southeast. This distribution was taken into account when developing the intelligence system - blocks of high categories A and B are located precisely in the central part. The areal analysis of the geological and industrial parameters of the studied sandstone deposit made it possible to establish the following regularities: the presence in the central part of the deposit of a fairly thick useful stratum (more than 10 m) with the smallest values of overburden (less than 1.0 m); the central part of the deposit is characterized by elevated values of silica SiO_2 , not very high contents of alumina Al_2O_3 and components that make up clay minerals. Thus, the central zone of the Dorogovskoye deposit is the most favorable in terms of the quality of sandstones planned to be used as raw materials for construction work.

Key words: field, well, “sliding window” method, contour maps, sandstones, conditions.

For citation: Bosikov I.I., Klyuev R.V., Silaev I.V. Comprehensive analysis and assessment of Prospective gold-ore zones using modern geophysical methods. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12(2): 89-102. DOI: 10.46698/VNC.2022.32.98.007.

Введение

В геологическом строении разведанного месторождения песчаника принимают участие каменноугольные и четвертичные отложения.

Каменноугольные отложения, слагающие описываемое месторождение, относятся к свите C_3^2 верхнего отдела карбона. В тектоническом отношении месторождение приурочено к осевой замковой части Белокалитвенской синклинали и характеризуется пологим залеганием слагающих его пород каменноугольного возраста.

В пределах участка породы карбона образуют плавный заворот пластов на северо-запад. Падение пород карбона на северо-запад, углы падения, вследствие близости к оси синклинали, очень пологие и составляют $2-3^\circ$.

В соответствии с данными, полученными в результате предварительной разведки, дизъюнктивные нарушения на описываемой площади не встречались. Объектом разведки на месторождении являлся пласт песчаника, представленный двумя пачками и залегающий между известняками O_3^0 и O_3^1 свиты C_3^2 верхнего отдела карбона [Босиков и др., 2021а, б; Голик и др., 2020].

Синонимы известняковых горизонтов O_3^0 и O_3^1 , залегающих соответственно в почве и кровле песчаника, установлены детальной геологической съёмкой масштаба 1:5000, произведенной на площади Белокалитвенского района. Материалы этой съёмки использовались при составлении настоящего проекта.

Ранее до 1956 года пласт песчаника в пределах месторождения или вблизи его ни одной из скважин не перебурен. Повсеместно на площади месторождения каменноугольные отложения перекрываются отложениями четвертичного возраста.

Четвертичные отложения представлены в основном лёсовидными суглинками и почвенным слоем. Суглинки плотные, вязкие, желто-бурого цвета, содержат местами известковистые включения и обломки песчаника. Мощность суглинков изменяется от 0,10 м (скважина №23) до 7,90 м (скважина №22) и составляет в среднем 2,45 м.

В центральной части участка, и районе скважин №№6, 7, 10, 19 и 21, суглинки отсутствуют и песчаники непосредственно перекрываются почвенным слоем. На отдельных участках мощность суглинков возрастает в направлении к водоразделу. Установить какую-либо закономерность в изменении мощности суглинков на площади всего месторождения не представляется возможным [Клюев и др., 2020; Земцовская, 2016; Костеневич и др., 2017; Лебедев и др., 2013].

В крайней восточной части оцениваемой площади под суглинком скважиной №13 вскрыт разнотекстуристый, глинистый песок мощностью 1,70 м. Почвенно-растительный слой повсеместно перекрывает суглинки, а в местах их отсутствия – песчаники. Мощность его изменяется от 0,10 до 0,40 м, при среднем значении 0,28 м.

Морфология и условия залегания пласта песчаников

Впервые в конце XX века детальными геологоразведочными работами уточнено залегание пласта песчаника, его мощность, а также изучены данные для установления качества полезного слоя. Пласт песчаника представлен двумя пачками. Непосредственно в почве нижней пачки пласта на площади месторождения отмечены глинистые сланцы, мощность их, вскрытая буровыми скважинами, изменяется от 0,60 до 2,40 м.

На отдельных участках по простиранию глинистые сланцы замещаются сланцами песчаными. Так, по скважинам №18 и №21 в почве нижней пачки пласта песчаника отмечены бурением сланцы песчаные мощностью соответственно 3,10 и 3,65 м. Сланцы, подстилающие песчаник [Туголуков и др., 2011; Чотчаев и др., 2021; Шарафелдин, 2018], а также толща пород, залегающая ниже до известняка O_3^0 , на полную мощность не перебурены.

Пласт песчаника $O_3^0SO_3^1$ сложен двумя пачками, разделенными прослоем глинистых сланцев. Выход песчаника верхней пачки под покровные отложения приурочен к юго-западной части разведочной площади, предполагаемый выход песчаника нижней пачки охватывает северо-восточную часть участка. Таким образом, геологоразведочными работами, произведенными на площади, ориентированной по падению пласта песчаника $O_3^0SO_3^1$, охвачены обе его пачки.

Верхняя пачка пласта песчаника перебурена 14-ю скважинами (№№3-бис, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 14, 15, 16, 17, 18, 19 и 20), причем из них две скважины (№4 и №18) остановлены в песчанике на отметках +18,2 и +23,9 м, так как целевым назначением разведочных работ являлась разведка песчаника до отметки уровня воды в реке Калитве (+17,9 м). Нижняя пачка перебурена скважинами №№12, 13, 22, 23 и 25 на полную свою мощность.

Кроме того, скважины №№8, 11-бис и 21 были пройдены с целью уточнения строения пласта песчаника $O_3^0SO_3^1$ и перебурены обе пачки песчаника с углублением в подстилающие породы. Скважины №1 и №3, остановленные на глубине 9,55 и 12,0 м соответственно, до песчаника недобурены.

По данным бурения скважин общая мощность верхней пачки пласта песчаника изменяется от 0,40 м (скважина №11-бис) до 24,0 м (скважина №10) и составляет в среднем 14,5 м. Мощность нижней пачки колеблется в пределах от 5,30 м (скважина №25) до 24,2 м (скважина №11-бис), составляя в среднем 15,47 м.

Закономерное увеличение мощности пласта песчаника наблюдается в северном направлении, в сторону падения пластов. Верхняя часть обеих пачек песчаника затронута выветриванием и выделяется в определенный горизонт плитчатого выветрелого песчаника, ниже которого залегает плотный неветрелый песчаник [Augustin, Gaboury, 2018; Ganapathy et al., 2020; Luo, Zeng, 2018; Nassani et al., 2021; Sebutsoe, Musingwini, 2017]. Общая мощность выветрелого и плотного песчаника верхней пачки изменяется от 0,40 до 3,60 м и составляет в среднем 3,37 м, песчаника нижней пачки от 1,0 до 9,2 м, при среднем значении 4,27 м.

Граница между плитчатой и плотной разностями песчаника в буровых скважинах устанавливалась по керну, при выходе столбика керна достаточно большой высоты, позволяющей отобрать первый образец для производства физико-механических испытаний; по глубине залегания первого образца устанавливалась верхняя граница плотных разностей песчаника [Sinclair, Thompson, 2015; Song et al., 2017; Tuylenev et al., 2016, 2018; Zhukovskiy et al., 2019].

Толща плотного не выветрелого песчаника по макроскопическим признакам в подавляющем большинстве своем однородна, прослоев иного литологического состава не содержит. Исключение составляют скважина №10, перебурившая верхнюю пачку песчаника, и скважины №№13 и 23, перебурившие нижнюю пачку, по данным которых в толще песчаника отмечено по одному прослою глинистых или песчаных сланцев, мощность прослоя составляет 0,20-0,60 м.

Петрографическая характеристика песчаников

По внешнему виду песчаники верхней и нижней пачек весьма сходны. Макроскопически песчаник $O_3^0SO_3^1$ мелкозернистый, серого цвета, слабослюдистый, с неровным изломом, плотный, местами ожелезнен.

На отдельных участках песчаник пересечен трещинами, причем трещиноватость приурочена в основном к средним частям верхней и нижней пачек пласта. Трещины имеют различное направление и иногда заполнены кварцем или гидроокислами железа.

Петрографическая характеристика песчаника свидетельствует о его довольно однородном составе. Под микроскопом песчаник мелко- и среднезернистый, реже разномзернистый, характеризуется преобладающим содержанием кварца, местами имеет полевошпатово-кварцевый или полимиктовый состав.

Содержание кварца изменяется в основном от 40 до 60% и только по пробе №4 из скважины №4 и пробе №24 из скважины №9 отмечается несколько пониженное его содержание (33 и 37%). Зерна кварца скатанные, часто трещиноватые, иногда содержат включения пылеватых частиц и минералов (апатит, циркон).

Полевые шпаты представлены в основном кислыми и средними плагиоклазами. Хорошо сохранившиеся зерна встречаются редко, чаще полевые шпаты подвергнуты процессам выветривания – полятизированы и серицитизированы. Содержание полевых шпатов в описываемых песчаниках колеблется в пределах от 10 до 20 % и отмечено по всем исследованным пробам.

Слюда представлена преимущественно бесцветными изогнутыми пластинками и содержится в песчанике в количестве от единичных зерен до 2-3%. Более высокое содержание слюды отмечено в пробах 3, 13, 14 и 15 из скважины №4, и в пробе 25 из скважины №9 (до 5-6%).

В составе кластогенного материала значительное место занимают измененные обломки кристаллических пород.

Цементом является кварцево-серицитово-глинистый материал с примесью гидроокислов железа, иногда с примесью карбонатов. Содержание цемента в песчаниках незначительное.

Результаты химических анализов проб песчаника, отобранных на месторождении, подтверждают петрографические последования. Согласно результатам анализа содержание SiO_2 в изученных пробах изменяется от 60,16 до 61,9%, составляя в среднем 75,28 %.

Al_2O_3 содержится в количестве 5,20-14,50%, при среднем значении 10,76%, Fe_2O_3+FeO , содержится от 2,00 до 8,84%, в среднем 4,17%. Содержание CaO изменяется от 0,05 до 10,6%, в среднем 3,13%, MgO от 0,20 до 2,06%, и среднем 0,39%, SO_3 от 0,05 до 0,55%, при среднем значении 0,29%. В пробе №5 из скважины №11 содержание SO_3 отмечено в виде следов.

Согласно результатам химических анализов и петрографических исследований песчаник верхней и нижней пачек пласта $O_3^0SO_3^1$ является однотипным и представлен полевошпатово-кварцевой разностью с примесью слюды.

Прослой, разделяющий верхнюю и нижнюю пачки песчаника, сложен в основном сланцами глинистыми. Следует отметить, что на отдельных участках по простиранию и в разрезе сланцы глинистые, постепенно спесчаниваясь, переходят в сланцы песчаные. На прилагаемых к отчету геологической карте и разрезах эти местные фациальные изменения, во избежание усложнения картографических ма-

териалов, не отображены, так как существенного значения в данном случае не имеют.

Сланцы, отделяющие верхнюю пачку песчаника от нижней, перебулены частично скважинами №№3-бис, 5, 6, 7, 9, 10, 14, 15, 16, 17, 19 и 20 с мощностью, изменяющейся от 0,10 до 5,40 м. Скважинами №№8, 11-бис и 21 прослой сланцев не разбурен на полную мощность, составляющую соответственно 7,0, 7,4 и 7,2 м.

В кровле описанного ниже пласта песчаника, по данным скважин №№1, 2-бис и 3, расположенных в крайней юго-западной части участка, отмечены сланцы глинистые, местами переходящие в сланцы песчаные. Мощность сланцев, перебуренных этими скважинами, составляет 2,35-11,70 м.

Анализ распределения геолого-промышленных параметров Дороговского месторождения песчаников

Исходным материалом для научно-исследовательской работы послужили результаты лабораторных исследований песчаника по 17 скважинам, пробуренным на площади Дороговского месторождения. Были исследованы 7 геолого-промышленных параметров: мощность вскрышных пород M_v , мощность полезного ископаемого M_{pi} , содержания SiO_2 , Al_2O_3 , $CaO + MgO$, TiO_2 , $Na_2O + K_2O$ по 17 пересечениям полезной толщи (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Результаты анализов геолого-промышленных параметров / Results of analyzes of geological and industrial parameters

$N_{S_{kv}}$	X	Y	M_v	M_{pi}	SiO_2	Al_2O_3	$CaO + MgO$	$Na_2O + K_2O$	TiO_2
4	7,8	16,3	4,3	20,25	87,3	5,05	0,64	1,43	0,12
5	9,8	11,8	3,4	23,8	90,5	4,74	0,38	1,12	0,07
15	11,0	21,1	5	12,1	88,9	5,12	0,64	1,38	0,17
14	11,6	16,8	3	15,6	92,6	3,74	0,52	1,06	0,09
23	11,5	18,9	4,5	0,9	87,7	2,88	0,49	0,83	0,14
9	15,6	17,0	1,3	17	89,4	5,46	0,73	1,51	0,21
16	15,4	13,9	2,2	12,2	87,8	4,28	0,45	1,37	0,22
20	17,6	21,8	0,9	15	90,4	6,31	0,48	1,76	0,17
21	18,4	18,3	0,4	10,1	91,8	3,94	0,53	0,95	0,08
7	20,4	22,2	0,4	8	89,6	4,38	0,39	1,28	0,08
10	21,3	18,7	0,4	5,6	86,8	6,44	0,71	1,8	0,22
22	19,4	15,1	3,5	4,7	92	2,96	0,55	0,86	0,19
8	24,3	22,9	2,3	15,8	90,2	4,63	0,49	1,27	0,15
11	25,0	19,2	3,9	22,2	87,5	6,08	0,38	1,64	0,08
6	14,4	22,5	0,4	19,4	88,2	5,1	0,45	1,2	0,1
17	9,8	27,2	1,3	11,8	89,6	5,02	0,62	1,03	0,11
18	6,4	13,9	2,4	18,8	89,4	4,96	0,68	1,62	0,25

Методика характеристики распределения геолого-промышленных параметров

В работе проводились исследования закономерностей распределения геолого-промышленных параметров в плане.

Для того, чтобы проследить распределение указанных параметров по площади, была использована следующая методика. Сначала были сняты условные координаты для каждой скважины, и составлена таблица показателей по пересечениям. Затем, на основании этих данных в программе Surfer построены карты изолиний методом «скользящего окна».

Методика построения заключается в следующем: в данном случае требуется оценить переменную в ряде точек сети или приписать значения последовательно примыкающим друг к другу прямоугольникам на карте. Данные, на основании которых делаются оценки, разбросаны на площади карты и могут лежать или не лежать в узлах сети. Фигура, аналогичная сглаживающему интервалу в анализе временного тренда, располагается так, чтобы её центр лежал в точке, в которой должна быть получена оценка. Всем данным точкам, лежащим внутри этой фигуры, приписываются некоторым образом веса, которые затем используются при получении оценки в центральной точке. Схема метода скользящего среднего состоит в том, что оцениваемой точке приписывается значение, равное среднему арифметическому всех наблюдений, лежащих внутри рассматриваемой фигуры. Фигура затем передвигается в следующий узел сетки, и процесс повторяется снова. Когда вычислены оценки для одной строки или столбца сети, переходят к следующей строке или столбцу, и так до тех пор, пока вся площадь карты не будет покрыта полностью.

Общую модель метода скользящего среднего можно записать в следующем виде:

$$Y_i = \sum_{k=1}^n W_k \cdot Y_r,$$

где W_k – нормированный вес (весовой коэффициент) k -го значения исходной функции; Y_r – значение исходной функции в момент времени, отдалённый от текущего на r – интервалов.

Оцениваемое значение Y_i строится на основании взвешенной суммы Y_k соседних наблюдений. Вид весовой функции изменяется от одной схемы скользящего среднего к другой. Например, в программе построения изолиний использовано скользящее среднее с весами, равными обратным величинам расстояний точек от Y_i .

Результаты работы и их обсуждение.

Описание карт распределения основных геолого-промышленных параметров. По карте распределения мощности вскрышных пород (рис. 1) можно сделать следующие выводы: минимальная мощность приурочена к центральной и северной частям участка, и возрастает на запад и юго-восток. Такое распределение учтено при разработке системы разведки – блоки высоких категорий А и В расположены именно в центральной части.

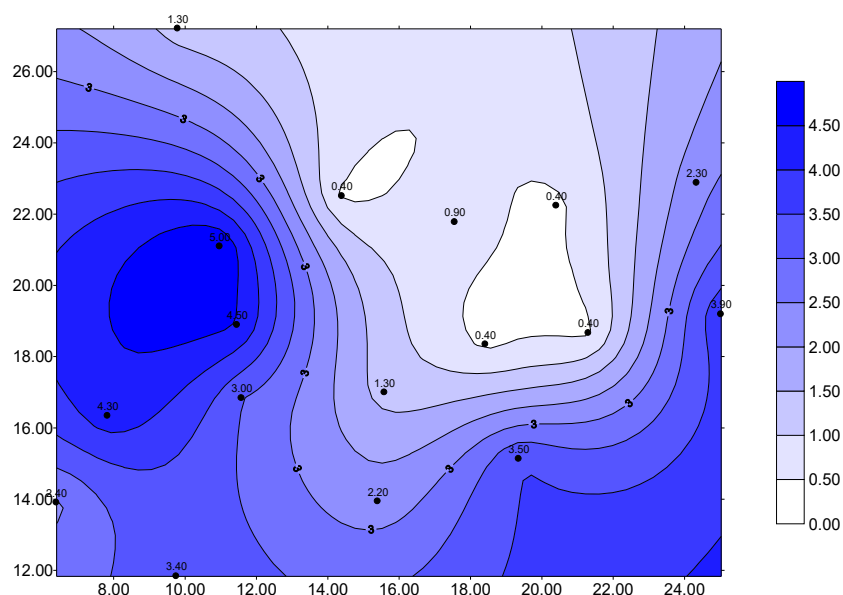


Рис. 1. Карта распределения значений мощности вскрышных пород /

Fig. 1. Map of distribution of overburden thickness values

Распределение мощности полезной толщи (рис. 2) имеет более сглаженный характер. Минимальная мощность приурочена к западной части за пределами участка разведки. Заложение карьера, а это участок разведанности по категориям А и В, намечается в центральной части, где мощность пласта песчаника достаточно высокая.

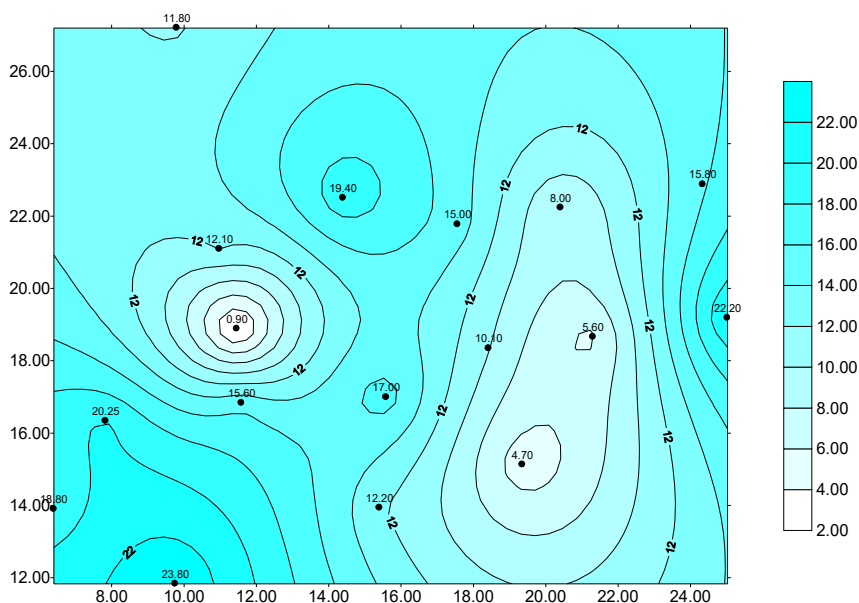


Рис. 2. Карта распределения значений мощности полезной толщи /

Fig. 2. Distribution map of useful thickness values

Распределение содержания SiO_2 (рис. 3) имеет мозаичный характер. Максимумы приурочены к центральной части участка разведки. Колебания содержаний незначительны, что свидетельствует о достаточной чистоте песчаника и значительном содержании кварца.

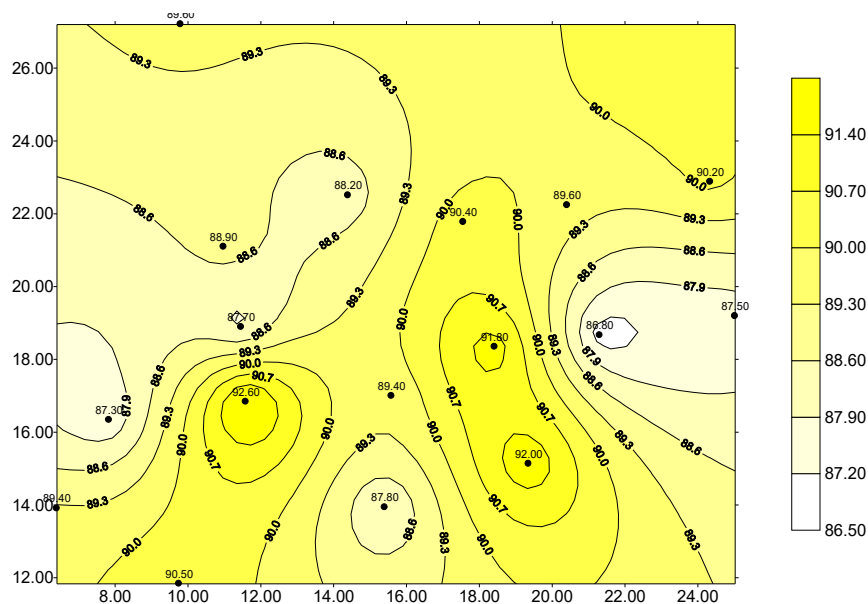
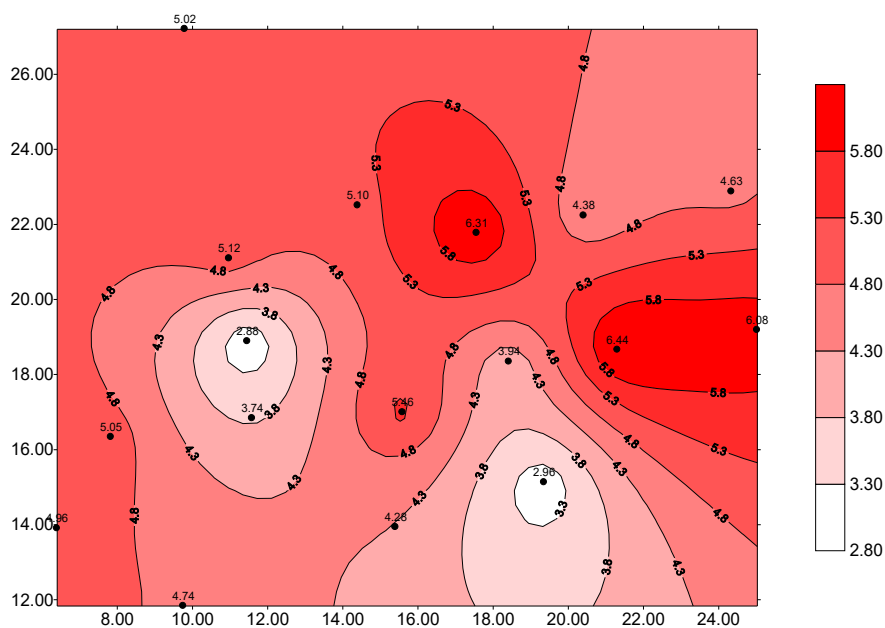


Рис. 3. Карта распределения содержаний SiO_2 /

Fig. 3. SiO_2 content distribution map

Распределение содержания Al_2O_3 (рис. 4) имеет также мозаичный характер. Максимумы приурочены к центральной и восточной частям участка разведки. Это может свидетельствовать о засоренности песчаника на этих площадях глинистыми минералами, т.е. о более низком качестве песчаного сырья.

Распределение содержания $\text{CaO}+\text{MgO}$ (рис. 5) также имеет мозаичный характер. По отношению к распределению содержания SiO_2 отмечается обратная корреляция. Максимумы приурочены к центральной и западной частям участка разведки. Это также может свидетельствовать о засоренности песчаника глинистыми минералами.



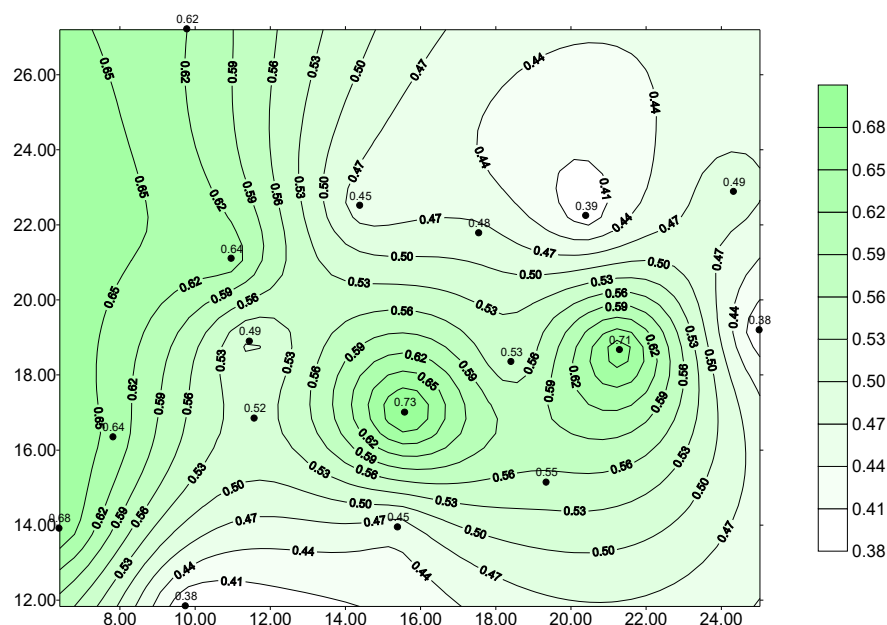


Рис. 5. Карта распределения содержаний $MgO+CaO$ /

Fig. 5. Distribution map of $MgO+CaO$ contents

Распределение содержания K_2O+Na_2O (рис. 6) имеет схожий характер с двумя предыдущими картами. По отношению к распределению содержания Al_2O_3 отмечается прямая корреляция. Это также может свидетельствовать о приуроченности рассматриваемых компонентов к одним минеральным формам.

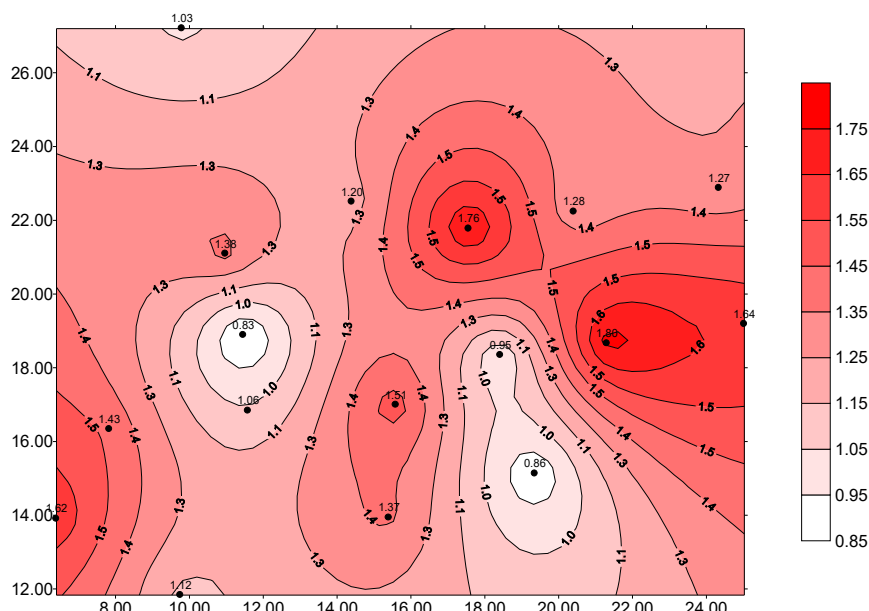


Рис. 6. Карта распределения содержаний K_2O+Na_2O /

Fig. 6. K_2O+Na_2O content distribution map

Распределение содержания TiO_2 (рис. 7) точно совпадает с распределением содержания K_2O+Na_2O .

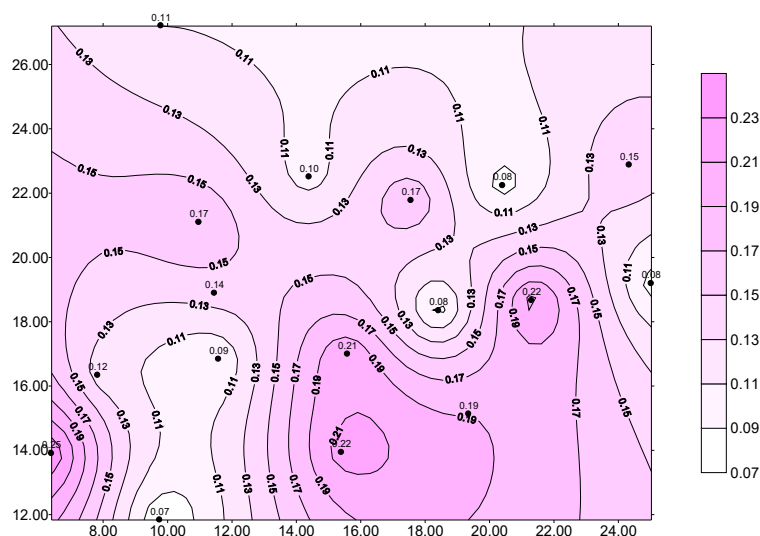


Рис. 7. Карта распределения содержаний TiO_2 /

Fig. 7. TiO_2 content distribution map

Выводы

Выполненный площадной анализ геолого-промышленных параметров Дороговского месторождения песчаников позволил установить следующие закономерности:

1. Наличие в центральной части месторождения достаточно мощной полезной толщи (более 10 м) с самыми незначительными значениями вскрышных пород (менее 1,0 м).

2. Эта же центральная часть месторождения характеризуется повышенными значениями кремнезема SiO_2 , не очень большими содержаниями глинозема Al_2O_3 и компонентов, входящих в состав глинистых минералов. Таким образом, центральная зона Дороговского месторождения является по качеству песчаников, планируемых использоваться в качестве сырья для строительных работ, наиболее благоприятной.

Литература

1. Босиков И.И., Ключев 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., Ключев 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. Ключев 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. Земцовская Е.В. Горнотехническая рекультивация отвалов скальных пород на примере АО «Ковдорский ГОК». // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – №7. – С. 384–391.
6. Костеневич К.А., Белоус О.И., Слюнкина С.А. Влияние условий формирования и постседиментационных процессов преобразования отложений на структуру пустотного пространства и фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов продуктивного горизонта тюменской свиты Краснотеннинского свода. // Современные проблемы седиментологии в нефтегазовом инжиниринге: труды III Всероссийского научно-практического седиментологического совещания, 10–12 апреля 2017 г. – Томск: Изд-во ЦППС НД, 2017. – С. 84–90.
7. Лебедев С.В., Нестеров Е.М., Зарина Л.М. Оценочные типы цифровых карт в методологии геоэкологического картографирования. // Проблемы региональной экологии. – 2013. – №5. – С. 53–57.
8. Туголуков А.В., Бармин И.С., Попович В.Ф., Лыгач В.Н. Исследование технологических свойств разновидностей апатит-штаффелитовых руд Ковдорского месторождения. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – №12. – С. 37–42.
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. No.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.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. Vol. 11. No.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. 2021. No. 1b. 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. Vol. 10. No.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. Zemtovskaya E.V. Rock dumps mining recultivation the case of «Kovdorsky GOK» JSC. Mining information and analytical bulletin. 2016. No. 7. pp. 384–391. (In Russ.)
6. Kostenevich K.A., Belous O.I., Slyunkina S.A. Influence of conditions of formation and post-sedimentation processes of sediment transformation on the structure of void space and reservoir properties of reservoir rocks of the productive horizon of the Tyumen suite of the Krasnoleninsky dome. In: *Proceedings of the III All-Russian Meeting Modern problems of sedimentology in oil and gas engineering*, April 10–12, 2017. Tomsk, TsPPS ND, 2017. pp. 84–90. (In Russ.)
7. Lebedev S.V., Nesterov E.M., Zarina L.M. Estimated types of digital maps in the methodology of geoecological mapping. *Problems of regional ecology*. 2013. No. 5. pp. 53–57. (In Russ.)
8. Tugolukov A.V., Barmin I.S., Popovich V.F., Lygach V.N. Investigation of the technological properties of varieties of apatite-staffelite ores of the Kovdor deposit. Mining information and analytical bulletin. 2011. No. 12. pp. 37–42. (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. Vol. 11. No. 1. pp. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007. (In Russ.)
10. Sharafeldin H.E. Late-orogenic gold deposits in Egypt. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2018. No. 1. pp. 89–96. DOI: 10.17073/2500-0632-2018-1-89-96. (In Russ.)
10. 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: 10.1016/j.oregeorev.2018.11.011.
11. 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. Vol. 12. No. 4. pp. 572–581. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-572-581.
12. 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.
13. 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. No.102271. DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102271.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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. Vol. 7. No. 4. pp. 363–370. DOI: 10.1504/IJMME.2016.079990.

18. 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. Vol. 36. No. 5. pp. 2789–2797. DOI: 10.1007/s10706-018-0501-3.

19. 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. Vol. 1333. No. 6. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033.

ГЕЭКОЛОГИЯ

УДК 591.9

[DOI: 10.46698/VNC.2022.30.68.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.30.68.008)

Оригинальная статья

Эксплуатация гидротехнических сооружений и трансформация сооружений, и трансформация прибрежного фаунистического комплекса (Tetrapoda) озера Лысый Лиман

Р.С. Губанов 

Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355017, г. Ставрополь,
ул. Пушкина, д. 1, e-mail: guevara78@mail

Статья поступила: 21.03.2022, доработана: 22.04.2022, одобрена в печать: 27.04.2022

Резюме: Экологическая оценка биотопов на региональном и локальном уровне предусмотрена Конвенцией сохранения биологического разнообразия, принятой в Рио-де-Жанейро в 1992 году. В 1980-х годах XX века в мире выделено порядка 13 тысяч ключевых орнитологических территорий, где ведется мониторинг состояния популяций птиц и экологическая оценка местообитаний. К такой территории относится и Озеро Лысый Лиман, где обитает и гнездится порядка 16, а также останавливается в период линьки и миграции около 17 видов птиц (кудрявый *Pelecanus crispus* и розовый пеликаны *Pelecanus onocrotalus*, колпица *Platalea leucorodia*, степная тиркушка *Glareola nordmanni* и др.). Исследования территории Приманычья, в том числе и фаунистические, на сегодняшний день достаточно обширно освещены в научной литературе. Однако, эти сведения несут региональный характер, без исследования локальных территорий. **Актуальность исследования** заключается в изучении влияния антропогенной деятельности, в частности гидротехнического строительства на фаунистический комплекс исследуемого участка. В данной статье проведено исследование состояния прибрежного фаунистического комплекса озера Лысый Лиман, при строительстве и эксплуатации гидротехнического сооружения – плотины озера. Произведен краткий ретроспективный анализ антропогенного воздействия на водный объект и последствия изменений для фаунистического комплекса прибрежных позвоночных. Был проведен мониторинг мест обитания позвоночных животных, определена структура распределения внутри биотопа. Также в ходе исследования установлены сведения о количестве видов животных, плотности населения и ее динамике, в связи с изменением среды обитания, а также о распределении животных по территории. Полученные данные по трансформации фаунистического комплекса прибрежных позвоночных могут быть использованы в качестве данных для учета популяций животных, а также позволяют дополнить уже имеющиеся сведения о структуре животного населения прибрежных биотопов Манычской долины. **Целью данной работы** являлось исследование влияния гидростроительства и эксплуатации гидротехнического сооружения на фаунистический комплекс рассматриваемой территории. Проведенное исследование позволяет оценить трансформацию распределения животного населения внутри фаунистического комплекса данной территории. **Методы исследования.** Во время проведения полевых исследований учет животных производился по методикам количественного учета животных. Также учитывалась связь животного населения с конкретными элементами среды обитания. При проведении исследований были осуществлены: мониторинг местообитаний позвоночных животных, а также определение структуры численности животного населения. **Результаты работы:** анализ влияния антропогенных факторов, выраженных в эксплуатации гидротехнических сооружений на фаунистический комплекс территории.

Ключевые слова: животное население, гидрологический режим, местообитание, экосистема.

Для цитирования: Губанов Р.С. Эксплуатация гидротехнических сооружений и трансформация сооружений, и трансформация прибрежного фаунистического комплекса (Tetrapoda) озера Лысый Лиман. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12(2): 103-116. DOI: 10.46698/VNC.2022.30.68.008.

[DOI: 10.46698/VNC.2022.30.68.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.30.68.008)

Original paper

Operation of hydraulic structures and transformation of structures, and transformation of the coastal faunal complex (Tetrapoda) of Lake Bald Estuary

R.S. Gubanov 

North Caucasian Federal University, 1 Pushkin str., Stavropol 355017, Russian Federation,
e-mail: guevara78@mail

Received: 21.03.2022, revised: 22.04.2022, accepted: 27.04.2022

Abstract: The ecological assessment of biotopes at the regional and local levels is provided for by the Convention on Biological Diversity, adopted in Rio de Janeiro in 1992. In the 1980s of the XX century, about 13 thousand key ornithological territories, where monitoring of the state of bird populations and environmental assessment of habitats is carried out, were identified in the world. Lake Lysyi Liman also belongs to this territory, where about 16 species lives and nests, and during the molting and migration period of about 17 species of birds (curly *Pelecanus crispus* and pink pelicans *Pelecanus onocrotalus*, spoonbill *Platalea leucorodia*, black-winged pratincole *Glareola nordmanni*, etc.) also stops. Studies of the Primanychie territory, including faunistic research, are currently quite extensively covered in the scientific literature. However, this information has a regional nature, without the study of local territories. **Relevance.** The relevance of the study consists in the study of the anthropogenic activity influence, in particular, the influence of hydraulic engineering construction on the faunal complex of the area under study. The article considers a study of the state of the coastal faunal complex of the Lake Lysyi Liman during the construction and operation of a hydraulic structure - the dam of the lake. A brief retrospective analysis of the anthropogenic impact on the water body and the consequences of changes for the faunal complex of coastal vertebrates was carried out. The habitats of vertebrates were monitored, and the structure of distribution within the biotope was defined. Also, during the study, the information on the number of animal species, population density and its dynamics (in connection with environmental changes, as well as on the distribution of animals over the territory) was established. The obtained data on the transformation of the faunal complex of coastal vertebrates can be used as data for animal populations accounting; these data also allow us to supplement already available information on the structure of the animal population of the coastal biotopes of the Manychskaya Valley. **Aim.** The study of the impact of hydraulic development and operation of a hydraulic structure on the faunal complex of the territory under consideration. The study allows evaluating the transformation of the distribution of animal population within the faunal complex of the given territory. **Methods.** During the field studies, the registration of animals was carried out according to the methods of quantitative accounting of animals. The connection of the animal population with specific elements of the habitat was also considered. Monitoring of the habitats of vertebrates, as well as determining the structure of the animal population, was carried out during the study. **Results.** The analysis of the influence of anthropogenic factors expressed in the operation of hydraulic structures on the faunal complex of the territory.

Keywords: animal population, hydrological regime, habitat, ecosystem.

For citation: Gubanov R.S. Operation of Hydraulic Structures and Transformation of Structures, and transformation of the Coastal Faunal Complex (Tetrapoda) of Lake Bald Estuary. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12(2): 103-116. DOI: 10.46698/VNC.2022.30.68.008.

Введение

Озеро Лысый Лиман, расположено в Манычской ложбине, в самом центре Кумо-Манычской впадины. Озеро проточное, с южной стороны в озеро впадает река Западный Маныч. Питается озеро водами реки Калаус, ее сток полностью перенаправлен в озеро. Эта территория интересна для исследования, в том числе и в связи с ее перестройкой человеком [Конвенция..., 1991].

В середине прошлого столетия в Центральном Предкавказье произошло масштабное гидротехническое строительство. Путем сооружения каналов и обводнительно-оросительных систем, была обеспечена переброска вод полноводных рек Кубани и Терека в наиболее засушливые территории. Обводнение таких рек, как Егорлык и Калаус обеспечило их стабильный гидрологический режим и регулярное питание пресной водой акватории, где расположены устья этих рек. Все это в корне изменило и состояние естественных водных объектов, принимающих воды обводненных рек [Каганович, 1996; Лиховид, Тертышников, 2001].

Достаточно сильно изменило характер естественных водных систем и строительство водоподпорных сооружений. Малые реки засушливых ландшафтов Центрального Предкавказья были разбиты на цепи прудов, путем строительства плотин и аккумуляции воды в водоемах, образованных на водотоках рек.

Перенаправление стока реки Калаус значительно изменило гидрологический режим озера, увеличился годовой сток наносов в два раза. Усиленная русловая эрозия, отложения наносов, уменьшение уклона водной поверхности способствовали активному росту жесткой надводной растительности. Этот процесс распространился на несколько километров вверх по руслу, сокращая подачу пресной воды в соленые воды Лысого Лимана, в засушливый период за счет испарения. Поступление воды из реки Калаус в засушливый период сокращалось до минимума, а весной, большой сток реки, наоборот сильно увеличивал объем озера. Непостоянный уровень воды мешал гнездованию птиц, приводя к гибели кладок. В 2008 г. были произведены работы по строительству плотины для стабилизации уровня воды в озере, что позволило сократить сток в весенний период и увеличить его в засушливый летний и осенний. Таким образом, распределение стока стало более равномерным в течение года. В 2016 году целостность плотины была нарушена, и гидрологический уровень воды изменился (рис. 1).



Рис. 1. Динамика акватории озера Лысый Лиман при строительстве гидротехнического сооружения /

Fig. 1. Dynamics of the water area of Lake Bald Estuary during the construction of a hydraulic structure

В настоящее время, исследования гидрологических изменений водных объектов и систем широко освещаются в научной литературе [Rohwer, 2015]. Исследование характерных особенностей трансформации фаунистических комплексов при антропогенном влиянии на гидрологический режим представляется актуальной зоогеографической проблемой.

Изучению вопроса влияния гидрологических изменений на природные комплексы в настоящее время посвящено достаточно большое количество работ, в том числе и в зарубежной научной литературе [Губанов, 2021; Лиховид, 1996, 2001; Abila, 1998; Agase, 2021; Balirwa, 1995; Kansime et al., 2007].

Целью данного исследования является изучение влияния гидростроительства и эксплуатации гидротехнического сооружения на фаунистический комплекс рассматриваемой территории.

Материалы и методы исследования

Данное исследование, основано на материале территориальных наблюдений озера Лысый Лиман, который был собран в период с 2015 по 2021 годы. Полевые исследования включали в себя изучение фаунистического разнообразия с учетом образа жизни животных с характерными условиями обитания.

Общая площадь исследуемой территории 2600 га. На значительном протяжении береговая линия озера Лысый Лиман открытая, глинистая, иногда обрывистая, вдоль берегов также имеются мелкие плёсы, чередующиеся с перекатами куртинных тростниковых зарослей. Данный водоем из-за очень замедленного водообмена относится к лентической экосистеме [Колесников, 2007]. Вокруг озера простираются обширные типчаковая и полынно-солончаковая степные равнины [Шальнев, 1995].



Рис. 2. Ключевые участки полевых исследований /

Fig. 2. Key areas of field research

Используя методы дистанционного зондирования, картографические материалы и полевые исследования можно выделить три характерных элемента местообитания животных (рис. 2): 1. Прибрежные территории; 2. Острова и плавни; 3. Мелководные участки занятые гидрофитной растительностью.

Учет животного населения производился по обобщенным методикам, обобщенным Методикам полевых исследований [Новиков, 1953; Степанян, 1990].

Учет амфибий и рептилий проводился методом визуального обследования территории, а их видовая принадлежность устанавливалась дистанционно [Тертышников, 1992].

На исследуемой территории обитают 2 вида земноводных, 5 видов пресмыкающихся, 65 видов птиц, 2 вида млекопитающих [Тертышников, 2002; Хохлов, 2000; Федоров, 1954, 1955, 1956; Харин, 2014]. Согласно системе зоогеографического (фаунистического) районирования ключевой участок исследования относится к Азово-Сарпинскому участку, Понтического округа степной провинции [Лиховид, 2001].

Для мониторинга и ретроспективного анализа озера Лысый Лиман и реки Калаус, в ходе исследования использовались космические снимки спутника landsat 8, на котором функционирует сервис GoogleMaps.

Результаты работы и их обсуждение

В 2008 г. начались работы по строительству плотины для постоянного регулирования стока и стабилизации уровня воды. К 2012 году была сооружена постоянная земляная плотина в северо-западной части озера. Уровень воды в озере был зарегулирован, что привело к общему увеличению и стабилизации стока.

Сокращение стока в весенний период снизило риск гибели кладок, а в летний период из-за увеличения стока незначительные понижения уровня воды обнажали грязевые участки, служащие стацией для кормежки куликов, цапель, чаек и крачек.

К 2015 году прочность земляной плотины, построенной в 2008 году, под воздействием внешних факторов была нарушена. Происходила резкая просадка плотины из-за размывания грунта, во избежание разрыва дамбы в 2016 году в дамбе был сооружен проход для снижения уровня воды. Вода отступила более чем на 2 метра, глубина сократилась на 70 см. Таким образом, гидрологическое состояние озера после аварийных работ 2016 г., в течение нескольких месяцев вернулось к отметкам 2008 года (рис. 2-3). Стабильный гидрологический режим был нарушен и на данный момент береговая линия озера сокращается. Увеличились участки тростниковых зарослей плавней, согласно данным дистанционного зондирования в 2016 году площадь плавней составляла 480 га, в 2018 – уже 640 га. Расширились участки пересыхающих в летний период прибрежных мелководий, а также происходит интенсивное зарастание береговой линии тростниковой растительностью, так площадь прибрежных тростниковых зарослей и подтопляемых участков пойменных лугов увеличились с 680 га в 2008 г. до 740 га 2021 году (рис. 3).



Рис. 3. Динамика изменения площади акватории оз. Лысый Лиман /

Fig. 3. Dynamics of changes in the area of the lake water lake Lysi Liman

Изменение гидрологического режима озера, прибрежных стадий изменяет структуру сформировавшегося фаунистического комплекса (таблицы 1-3).

Таблица 1 / Table 1

**Население наземных позвоночных песчаных и глинистых прибрежных
территорий озера Лысый Лиман, особей/га /
Population of terrestrial vertebrates of sandy and clay coastal areas of Lake Lake
Lysi, individuals/ha**

№	Вид / Species	Плотность населения, особей/га / Population density, individuals/ha			
		2015 г.	2017 г.	2019 г.	2021 г.
1	Лягушка озерная (<i>Rana ridibunda</i>) / Lake frog (<i>Rana ridibunda</i>)	6,3	7,2	7,7	8,1
2	Уж водяной (<i>Natrix tessellata</i>) / Tesselated water snake (<i>Natrix tessellata</i>)	0,01	0,01	0,01	0,01
	Ящерица полосатая (<i>L. strigata</i>) / Five-streaked lizard (<i>L. strigata</i>)	-	0,02	0,09	0,1
3	Большая белая цапля (<i>Egretta alba</i>) / White heron (<i>Egretta alba</i>)	0,02	0,016	0,015	0,015
4	Серая цапля (<i>Ardea cinerea</i>) / Gray heron (<i>Ardea cinerea</i>)	0,01	0,01	0,02	0,02
5	Огарь (<i>Tadorna ferruginea</i>) / Ruddy shelduck (<i>Tadorna ferruginea</i>)	0,01	0,02	0,03	0,025
6	Пеганка (<i>Tadorna</i>) / Shelgoose (<i>Tadorna</i>)	0,03	0,03	0,02	0,02
7	Авдотка (<i>Burhinus oedicephalus</i>) / Stone curlew (<i>Burhinus oedicephalus</i>)	-	-	0,005	0,009
8	Малый зуек (<i>Charadrius dubiuscuronicus</i>) / Little ringed plover (<i>Charadrius dubiuscuronicus</i>)	0,003	0,001	0,001	0,004
9	Чибис (<i>Vanellus</i>) / Lapwing (<i>Vanellus</i>)	0,02	0,01	0,03	0,04
10	Ходулочник (<i>Himantopus</i>) / Black-winged stilt (<i>Himantopus</i>)	0,01	0,025	0,035	0,044
11	Шилоклювка (<i>Recurvirostra avosetta</i>) / Avocet (<i>Recurvirostra avosetta</i>)	-	0,01	0,09	0,025
12	Чайка хохотунья (<i>Larus cachinnans</i>) / Caspian gull (<i>Larus cachinnans</i>)	0,05	0,05	0,05	0,05
13	Черноголовая чайка (<i>Ichthyaeus melanocephalus</i>) / Mediterranean gull (<i>Ichthyaeus melanocephalus</i>)	0,05	0,04	0,03	0,03
14	Сизая чайка (<i>Larus canus</i>) / Common gull (<i>Larus canus</i>)	0,01	0,015	0,01	0,01
15	Малая крачка (<i>Sterna albifrons</i>) / Little tern (<i>Sterna albifrons</i>)	0,02	0,015	0,02	0,03
16	Чайконосная крачка (<i>Gelochelidon nilotica</i>) / Gull-billed tern (<i>Gelochelidon nilotica</i>)	0,01	0,03	0,01	0,01
17	Береговая ласточка (<i>Riparia riparia</i>) / Common sand martin (<i>Riparia riparia</i>)	0,01	0,02	0,025	0,1
18	Трапоугза черноголовая (<i>Motacilla feldegg</i>) / Black-headed wagtail (<i>Motacilla feldegg</i>)	-	-	0,02	0,06
19	Жаворонок хохлатый (<i>Galerida cristata</i>) / Crested lark (<i>Galerida cristata</i>)	-	0,09	0,4	0,7
20	Каменка-пясунья (<i>O. isabellina</i>) / Isabelline chat (<i>O. isabellina</i>)	-	-	0,08	0,1
21	Водяная полевка (<i>Arvicola terrestris</i>) / Water vole (<i>Arvicola terrestris</i>)	0,02	0,02	0,02	0,02

Таблица 2 / Table 2

**Население наземных позвоночных мелководных участков, занятых гидрофитной растительностью озера Лысый Лиман, особей/га /
The population of terrestrial vertebrates of shallow water areas occupied by hydrophytic vegetation of Lake Lake Lysi, individuals/ha**

№	Вид / Species	Плотность населения, особей/га / Population density, individuals/ha			
		2015 г.	2017 г.	2019 г.	2021 г.
1	Озерная лягушка (<i>Rana ridibunda</i>) / Lake frog (<i>Rana ridibunda</i>)	12,4	11,3	10,9	10,7
2	Черепаха болотная (<i>Emys orbicularis</i>) / Swamp turtle (<i>Emys orbicularis</i>)	0,01	0,01	0,01	0,01
3	Обыкновенный уж (<i>Natrix</i>) / Green snake (<i>Natrix</i>)	0,06	0,06	0,07	0,07
4	Водяной уж (<i>Natrix tessellata</i>) / Tessellated water snake (<i>Natrix tessellata</i>)	0,1	0,09	0,09	0,1
5	Малая поганка (<i>Podiceps ruficollis</i>) / Little grebe (<i>Podiceps ruficollis</i>)	0,15	0,15	0,15	0,15
6	Сeroшекая поганка (<i>Podiceps grisegena</i>) / Red-necked grebe (<i>Podiceps grisegena</i>)	0,01	0,015	0,09	0,09
7	Большая поганка (<i>Podiceps cristatus</i>) / Great-crested grebe (<i>Podiceps cristatus</i>)	0,5	0,3	0,4	0,4
8	Большая белая цапля (<i>Egretta alba</i>) / White heron (<i>Egretta alba</i>)	0,03	0,02	0,03	0,04
9	Малая белая цапля (<i>Egretta garzetta</i>) / Little heron (<i>Egretta garzetta</i>)	0,02	0,02	0,01	0,01
10	Серая цапля (<i>Ardea cinerea</i>) / Gray heron (<i>Ardea cinerea</i>)	0,02	0,02	0,02	0,02
11	Большая выпь (<i>Botaurus stellaris</i>) / Eurasian bittern (<i>Botaurus stellaris</i>)	0,04	0,03	0,03	0,01
12	Лебедь-шипун (<i>Cygnus olor</i>) / Mute swan (<i>Cygnus olor</i>)	0,05	0,05	0,05	0,045
13	Огарь (<i>Tadorna ferruginea</i>) / Ruddy shelduck (<i>Tadorna ferruginea</i>)	0,02	0,02	0,01	0,01
14	Пеганка (<i>Tadorna tadorna</i>) / Shelgoose (<i>Tadorna tadorna</i>)	0,09	0,08	0,08	0,01
15	Кряква (<i>Anas platyrhynchos</i>) / Mallard (<i>Anas platyrhynchos</i>)	0,1	0,4	0,5	0,7
16	Чирок-свистунок (<i>Anas crecca</i>) / Common teal (<i>Anas crecca</i>)	0,01	0,3	0,4	0,4
17	Чирок-трескунок (<i>Anas querquedula</i>) / Garganey teal (<i>Anas querquedula</i>)	0,003	0,001	0,1	0,1
18	Серая утка (<i>Anas strepera</i>) / Gadwall (<i>Anas strepera</i>)	0,005	0,005	0,005	0,003
19	Красноносый нырок (<i>Netta rufina</i>) / Rufous-crested duck (<i>Netta rufina</i>)	0,04	0,005	0,002	0,001
20	Болотный лушь (<i>Circus aeruginosus</i>) / Marsh harrier (<i>Circus aeruginosus</i>)	0,001	0,002	0,002	0,001
21	Камышиница (<i>Gallinula chloropus</i>) / Common gallinule (<i>Gallinula chloropus</i>)	0,2	0,1	0,08	0,05
22	Лысуха (<i>Fulica atra</i>) / Black coot (<i>Fulica atra</i>)	0,5	0,3	0,4	0,3
23	Пастушок (<i>Rallus aquaticus</i>) / Water-rail (<i>Rallus aquaticus</i>)	0,04	0,03	0,03	0,03

24	Погоньш (Porzana porzana) / Spotted crane (Porzana porzana)	0,1	0,2	0,1	0,1
25	Обыкновенная кукушка (Cuculus canorus) / Common cuckoo (Cuculus canorus)	0,02	0,02	0,02	0,02
26	Болотная камышовка (Acrocephalus palustris) / Marsh-warbler (Acrocephalus palustris)	1,5	1,7	2,1	1,9
27	Камышевка барсучок (Acrocephalus schoenobaenus) / Sedge-warbler (Acrocephalus schoenobaenus)	0,3	0,2	0,4	0,3
28	Дроздовидная камышовка (Acrocephalus arundinaceus) / Great reed warbler (Acrocephalus arundinaceus)	2,1	1,8	2,4	2,6
29	Камышевка индийская (Acrocephalus agricola) / Paddyfield warbler (Acrocephalus agricola)	0,7	0,8	1,0	0,9
30	Камышевка тростниковая (Acrocephalus scirpaceus) / Reed warbler (Acrocephalus scirpaceus)	0,9	1,1	1,2	1,2
31	Ондатра (Ondatra zibethicus) / Muskrat (Ondatra zibethicus)	0,3	0,3	0,3	0,3
32	Водяная полевка (Arvicola amphibius) / Water vole (Arvicola amphibius)	1,3	1,1	1,2	1,1

Таблица 3 / Table 3

**Население наземных позвоночных островов Лысый Лиман, особей/га /
The population of terrestrial vertebrate islands of Lake Lake Lysi, individuals/ha**

№	Вид / Species	Плотность населения, особей/га /			
		2015 г.	2017 г.	2019 г.	2021 г.
1	Озерная лягушка (Rana ridibunda) / Lake frog (Rana ridibunda)	7,4	7,3	7,9	8,2
2	Водяной уж (Natrix tessellata) / Tessellated water snake (Natrix tessellata)	0,05	0,06	0,07	0,07
3	Малая поганка (Podiceps ruficollis) / Little grebe (Podiceps ruficollis)	0,01	0,01	0,01	0,01
4	Серошеекая поганка (Podiceps grisegena) / Red-necked grebe (Podiceps grisegena)	0,01	0,01	0,01	0,01
5	Большая поганка (Podiceps cristatus) / Great-crested grebe (Podiceps cristatus)	0,3	0,4	0,7	0,6
6	Большая белая цапля (Egretta alba) / White heron (Egretta alba)	0,05	0,05	0,05	0,05
7	Малая белая цапля (Egretta garzetta) / Little heron (Egretta garzetta)	0,04	0,03	0,03	0,04
8	Серая цапля (Ardea cinerea) / Gray heron (Ardea cinerea)	0,02	0,02	0,01	0,01
9	Кряква (Anas platyrhynchos) / Mallard (Anas platyrhynchos)	0,8	1,5	1,5	1,2
10	Красноносый нырок (Netta rufina) / Rufous-crested duck (Netta rufina)	0,12	0,31	0,45	1,4
11	Болотный лунь (Circus aeruginosus) / Marsh harrier (Circus aeruginosus)	0,01	0,02	0,02	0,01
12	Красавка (Anthropoides virgo) / Demoiselle crane (Anthropoides virgo)	0,03	0,03	0,04	0,04
13	Камышиница (Gallinula chloropus) / Common gallinule (Gallinula chloropus)	0,2	0,4	0,3	0,5

14	Лысуха (<i>Fulica atra</i>) / Black coot (<i>Fulica atra</i>)	0,5	0,6	0,6	0,7
15	Пастушок (<i>Rallus aquaticus</i>) / Water-rail (<i>Rallus aquaticus</i>)	0,02	0,03	0,1	0,01
16	Погоньи (<i>Porzana porzana</i>) / Spotted crane (<i>Porzana porzana</i>)	0,4	0,4	0,4	0,3
17	Обыкновенная кукушка (<i>Cuculus canorus</i>) / Common cuckoo (<i>Cuculus canorus</i>)	0,002	0,002	0,002	0,002
18	Болотная камышовка (<i>Acrocephalus palustris</i>) / Marsh-warbler (<i>Acrocephalus palustris</i>)	1,5	1,7	2,1	1,9
19	Камышевка барсучок (<i>Acrocephalus schoenobaenus</i>) / Sedge-warbler (<i>Acrocephalus schoenobaenus</i>)	0,3	0,2	0,4	0,3
20	Дроздовидная камышовка (<i>Acrocephalus arundinaceus</i>) / Great reed warbler (<i>Acrocephalus arundinaceus</i>)	2,1	1,8	2,4	2,6
21	Камышевка индийская (<i>Acrocephalus agricola</i>) / Paddyfield warbler (<i>Acrocephalus agricola</i>)	0,9	0,8	1,0	0,9
22	Камышевка тростниковая (<i>Acrocephalus scirpaceus</i>) / Reed warbler (<i>Acrocephalus scirpaceus</i>)	0,9	1,1	1,2	1,2

После снижения уровня воды при строительстве аварийного сброса, в ходе исследования наблюдались изменения в плотности и распределении животного населения в местах обитания, в частности орнитофауны. Незначительное уменьшение площади зеркала озера и увеличение площади жесткой надводной растительности, сократили привычные места обитания и гнездования птиц, способствовав тем самым перемещению в более благоприятные места обитания, в пределах озера. На исследуемой территории прослеживается увеличение плотности населения птиц – обитателей плесов и плавней. Так на территориях плавней увеличилась плотность красноголового нырка.

Достаточно хорошо заметно предпочтение участков исследуемой территории для гнездования утиных птиц. Нырковые утки стараются занимать более влажные участки, а другие речные, придерживаются более сухих. Так кряква является более пластичным видом и охотно селится на разных участках, а вот чирковые утки предпочитают сухие места (рис. 5).

Стоит также обратить внимание и на то, что разные птицы неодинаково воспринимают и гидрологические изменения озера. Если колебания уровня воды до 30 см не сильно влияют на гнездование поганки, лысухи или камышницы, то кулики более остро реагируют на них и стараются селиться в более сухих местах.

В ходе исследования, в устье реки Калаус, на довольно большом участке, покрытом тростником, увеличилась плотность красавки (*Anthropoidesvirgo*).

Интересным изменениям подверглись острова, в северо-восточной части озера. Здесь увеличились гнездовые колонии большого баклана (*Phalacrocoraxcarbo*).

На участках песчаных и глинистых берегов после отступления воды и зарастания типичной степной растительностью прослеживается появление факультативных видов, населяющих поймы. С 2015–2021 гг. отмечено появление ящерицы полосатой (*L. strigata*), крайне редкой авдотки (*Burhinusoedicnemus*), жаворонка хохлатого (*Galeridacristata cristata*), черноголовой трясогузки (*Motacillafeldeggefeldegge*) и каменки-плясуньи (*O.isabellina*). Несколько увеличилась численность шилоклюв-

ковых *Recurvirostridae*, обустроивших гнезда на открытых участках берега. Следовательно, увеличение площади соленых мелководных участков в прибрежной части озера увеличило размеры местообитания этих птиц.

Отдельно стоит сказать об увеличении солености озера. Как уже сказано ранее, основным источником подпитки озера пресной водой является река Калаус. Активное зарастание устья Калауса увеличивает количество наносов, заиливая многочисленные водотоки устья. Это сокращает поступление пресной воды в озеро Лысый Лиман и увеличивает потери пресной воды, в результате фильтрации и испарения (рис. 4). В связи с этим увеличивается соленость озера. В целом озеро Лысый Лиман по степени засоленности относится к солоноватым водам и содержание солености в водах колеблется от 1,2 г/л до 3,2 г/л. Однако, в последние годы минерализация увеличивается и колеблется от 1,8 г/л до 3,1 г/л. Еще одним фактором изменения минерального состава воды является внесение удобрений на прилегающих сельскохозяйственных землях. При попадании удобрений в реки, в течение долгого времени меняется микроэлементный состав поверхностных вод [Реутова, 2021]. К косвенным признакам изменения минерализации вод озера можно отнести истощение запасов подземных вод [Аллабергенова, 2019].

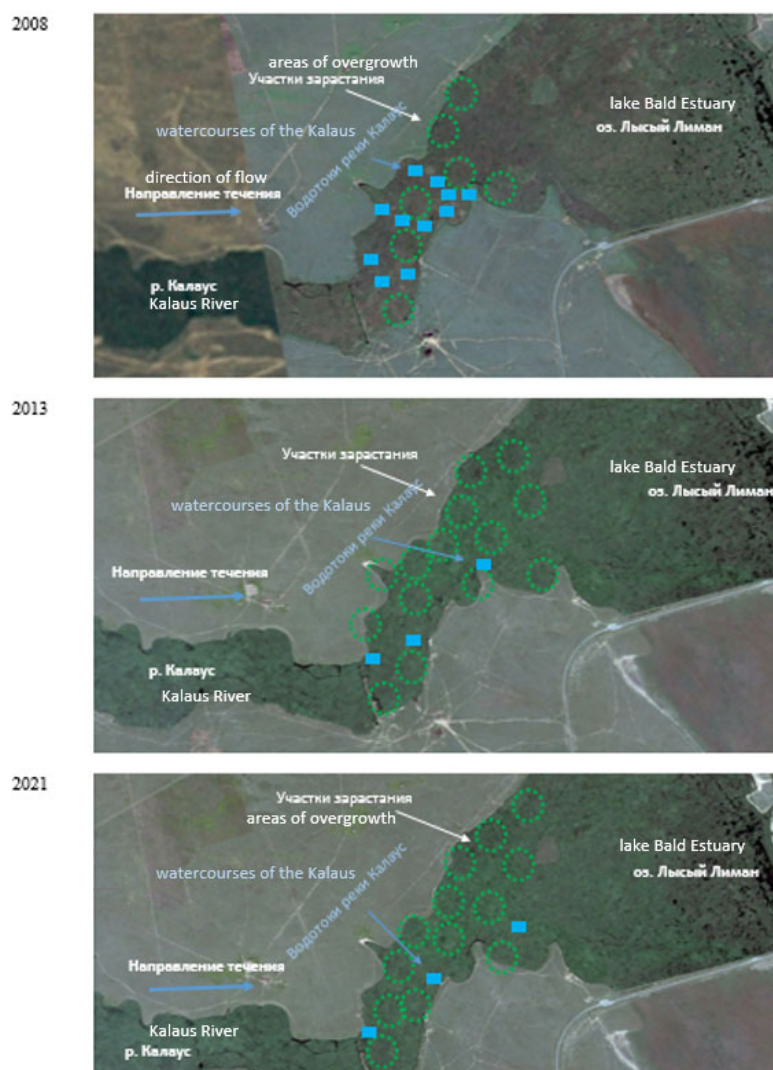


Рис. 4. Динамика изменения устья реки Калаус 2008–2021 гг. /

Fig. 4. Dynamics of changes in the mouth of the Kalaus River 2008-2021

Резюмируя, можно утверждать, что изменение плотности животного населения, его видового состава определяются состоянием гидрологического режима и его динамикой. Нестабильность уровня воды является наиболее важным фактором трансформации структуры распределения животного населения. Эксплуатация гидротехнического сооружения прямо влияет на видовой состав и распространение позвоночных.

Перестройка природных систем при масштабном гидротехническом строительстве в середине прошлого века повлекла за собой трансформацию фаунистических комплексов, происходившую в течение порядка 50 лет. К настоящему времени сформировались климаксовые сообщества биотопов и любые изменения экологических компонентов ведут к сукцессионным процессам.

Водные системы стали взаимосвязаны между собой и зависимы от состояния гидротехнических и водоподпорных сооружений, поэтому необходим должный контроль над их состоянием, а также своевременные мероприятия по ремонтным работам.

Выводы

Коренная перестройка гидрографических объектов Центрального Предкавказья в середине XX века сформировала природно-антропогенные системы, которые напрямую зависят от антропогенной деятельности. Как показывает исследование, эксплуатация гидротехнических сооружений, ее характер напрямую влияет на экологическое состояние биотопов, в том числе и на прибрежный фаунистический комплекс.

На примере озера Лысый Лиман, можно наблюдать роль антропогенного фактора, заключающегося в эксплуатации гидротехнических сооружений и обводнительно-распределительных сетей, на гидрологический режим и состояние биотопа.

Изменение гидрологического режима озера определяет видовой состав растительности и ее распространенность, а также на видовой состав и распространение прибрежных и околородных позвоночных.

Для сохранения устойчивого состояния фаунистического комплекса территории и недопущения возникновения сукцессионных процессов, необходим постоянный мониторинг состояния водных объектов, в том числе и с применением методов дистанционного зондирования Земли, а также своевременный ремонт гидротехнических сооружений и мероприятия по расчистке обводнительно-распределительных русел, к которым, в данном исследовании относится река Калаус.

Литература

1. Аллабергенова Э.М. Некоторые гидрологические аспекты опустынивания Ногайского района Республики Дагестан. // Геология и Геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. №4. – С. 6–12. DOI: 10.23671/VNC.2019.4.44484.
2. Губанов Р.С., Лиховид А.А. Основные этапы формирования прибрежного фаунистического комплекса (tetrapoda) среднего течения реки Егорлык. // Наука. Инновации. Технологии. – 2021. – №4. – С. 41–62.
3. Каганович Л.М. Развитие мелиорации в Ставропольском крае. – Пятигорск: Севкаспроводхоз, 1996. – 207 с.
4. Колесников С.И. Экология. Учебное пособие для высших учебных заведений. – М.: Наука пресс, 2007. – 197 с.
5. Конвенция о водно-болотных угодьях, имеющих международное значение, главным образом в качестве местообитания водоплавающих птиц (Рамсар). // Свод нормативных актов ЮНЕСКО. – М.: Международные отношения, 1991. – С. 191–199.

6. Новиков Г.А. Полевые исследования по экологии наземных позвоночных. // Изв. Всес. геогр. об-ва. – 1953. – 602 с.
7. Лиховид Н.Г. Флора водно-болотных и переувлажненных местообитаний Предкавказья и перспективы ее изучения. // Вестник Ставропольского государственного университета. – 1996. – Вып. 6. (Естественные науки). – С. 134–137.
8. Лиховид А.А., Тертышников М.Ф. Зоогеографическое (фаунистическое) районирование Предкавказья. // Современная биогеография. – М.: ИИЕТ РАН, 2001. – С. 83–86.
9. 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. – Т. 11. №3. – С. 172–184. DOI: 10.46698/VNC.2021.20.60.014
10. Степанян Л.С. Конспект орнитологической фауны СССР. – М.: Наука, 1990. – 726 с.
11. Тертышников М.Ф. Ареалогический анализ и герпето-географическое районирование Предкавказья. // Фауна Ставрополя. Вып. 4. – Ставрополь: СГПИ, 1992. – С. 118–132.
12. Тертышников М.Ф., Лиховид А.А., Гороя В.И., Харченко Л.Н. Позвоночные животные Ставрополя. – Ставрополь: Сервисшкола, 2002. – 224 с.
13. Харин К.В., Лиховид А.А. Мониторинг биоразнообразия наземных позвоночных животных на территории Апанасенковского района Ставропольского края. // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2014. – №3(42). – С. 62–68.
14. Хохлов А.Н. Животный мир Ставрополя (состав и распределение наземных позвоночных). – Ставрополь: Ставропольсервисшкола, 2000. – 200 с.
15. Федоров С.М. Млекопитающие (Mammalia) Ставропольского края. // Материалы по изучению Ставропольского края. Вып. 6. – Ставрополь: Ставропольское книжное изд-во, 1954. – С. 76–84.
16. Федоров С.М. Птицы Ставропольского края. // Материалы по изучению Ставропольского края. Вып. 7. – Ставрополь: Ставропольское книжное изд-во, 1955. – С. 54–59.
17. Федоров С.М. Пресмыкающиеся, земноводные, круглоротые и рыбы Ставропольского края. // Материалы по изучению Ставропольского края. Вып. 8. – Ставрополь: Ставропольское кн. изд-во, 1956. – С. 105–110.
18. Шальнев В.А. Ландшафты Ставропольского края. – Ставрополь: СГПУ, 1995. – 52 с.
19. Abila R. Utilisation and economic valuation of the Yala swamp wetland. In: Gauler M (ed) Strategies for wise use of wetlands-Best practices in participatory management. Proceedings of the 21st International conference on wetlands and development, November 1998. – Dakar, Senegal.
20. Balirwa J.S. The Lake Victoria environment: its fisheries and wetlands - a review. // Wetl Ecol Manage. – 1995. – No.3 – pp. 209–224.
21. Agase D.M., Bisen M.K., Markam M.S., Kothe T.S. and Soni A.S. Study on avifaunal diversity of Wainganga river basin at Balaghat district of Madhya Pradesh. // Journal of Entomology and Zoology Studies. – 2021. – Vol. 9(5). – pp. 205–213.
22. Kansime F., Saunders M.J., Loiselle S.A. Functioning and dynamics of wetland vegetation of Lake Victoria: an overview. // Wetlands Ecology and Management. – 2007. – Vol. 15. – pp. 443–451.
23. Rohwer S., Grason E., Navarro-Sigüenza A.G. Irrigation and avifaunal change in coastal Northwest Mexico: has irrigated habit attracted threatened migratory species? // Peer J. – 2015. – No.3. e1187. <https://doi.org/10.7717/peerj.1187>.

References

1. Allabergenova E.M. Some hydrological aspects of desertification in the Nogai region of the Republic of Dagestan. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2019. T. 9. No. 4. pp. 6–12. DOI: 10.23671/VNC.2019.4.44484. (In Russ.)
2. Gubanov R.S., Likhovid A.A. The main stages in the formation of the coastal faunistic complex (tetrapoda) of the middle course of the Egorlyk River. *The science. Innovation. Technology*. 2021. No. 4. pp. 41–62. (In Russ.)

3. Kaganovich L.M. Development of melioration in the Stavropol Territory. Pyatigorsk, Sevkagiprovodkhoz, 1996. 207 p. (In Russ.)
4. Kolesnikov S.I. Ecology. Textbook for higher educational institutions. Moscow. Nauka press, 2007. 197 p. (In Russ.)
5. Convention on Wetlands of International Importance, Principally as a Habitat for Waterfowl (Ramsar). Code of normative acts of UNESCO. Moscow. International relations, 1991. pp. 191–199. (In Russ.)
6. Novikov G.A. Field research on the ecology of terrestrial vertebrates. In: Proceedings of the All-Union Geographical Society. 1953. 602 p. (In Russ.)
7. Likhovid N.G. Flora of wetland and waterlogged habitats of Ciscaucasia and prospects for its study. Bulletin of the Stavropol State University. 1996. Issue. 6. (Natural sciences). pp. 134–137. (In Russ.)
8. Likhovid A.A., Tertyshnikov M.F. Zoogeographic (faunistic) zoning of Ciscaucasia. Modern biogeography. Moscow, IHST RAN, 2001. pp. 83–86. (In Russ.)
9. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M. Microelement composition of surface waters of the Malka river basin and geochemical features of the region. Geology and geophysics of the South of Russia. 2021. Vol. 11. No.3. pp. 172–184. DOI: 10.46698/VNC.2021.20.60.014 (In Russ.)
10. Stepanyan L.S. Synopsis of the ornithological fauna of the USSR. Moscow, Nauka, 1990. 726 p. (In Russ.)
11. Tertyshnikov M.F. Arealogical analysis and herpeto-geographical zoning of Ciscaucasia. Fauna of Stavropol. Issue. 4. Stavropol, SGPI, 1992. pp. 118–132. (In Russ.)
12. Tertyshnikov M.F., Likhovid A.A., Gorovaya V.I., Kharchenko L.N. Vertebrate animals of the Stavropol region. Stavropol, Servisshkola, 2002. 224 p. (In Russ.)
13. Kharin K.V., Likhovid A.A. Monitoring of the biodiversity of land vertebrate animals in the territory of the Apanasenskiy region of Stavropol Region. Bulletin of the North Caucasian Federal University. 2014. No. 3. Issue 42. pp. 62–68. (In Russ.)
14. Khokhlov A.N. Fauna of the Stavropol region (composition and distribution of terrestrial vertebrates). Stavropol, Stavropol'servisshkola, 2000. 200 p. (In Russ.)
15. Fedorov S.M. Mammals (Mammalia) of the Stavropol Territory. Materials for the study of the Stavropol Territory. Issue. 6. Stavropol, Stavropol book publisher, 1954. pp. 76–84. (In Russ.)
16. Fedorov S.M. Birds of the Stavropol Territory. Materials for the study of the Stavropol Territory. Issue. 7. Stavropol, Stavropol book publisher, 1955. pp. 54–59. (In Russ.)
17. Fedorov S.M. Reptiles, amphibians, cyclostomes and fish of the Stavropol Territory. Materials for the study of the Stavropol Territory. Issue. 8. Stavropol, Stavropol book publisher, 1956. pp. 105–110. (In Russ.)
18. Shalnev V.A. Landscapes of the Stavropol Territory. Stavropol, SGPU, 1995. 52 p. (In Russ.)
19. Abila R. Utilisation and economic valuation of the Yala swamp wetland. In: Gauler M (ed) Strategies for wise use of wetlands-Best practices in participatory management. Proceedings of the 21st International conference on wetlands and development, November 1998. Dakar, Senegal.
20. Balirwa J.S. The Lake Victoria environment: its fisheries and wetlands - a review. Wetlands Ecology and Management. 1995. No.3 pp. 209–224.
21. Agase D.M., Bisen M.K., Markam M.S., Kothe T.S., Soni A.S. Study on avifaunal diversity of Wainganga river basin at Balaghat district of Madhya Pradesh. Journal of Entomology and Zoology Studies. 2021. Vol. 9. Issue 5. pp. 205–213.
22. Kansime F., Saunders M.J., Loiselle S.A. Functioning and dynamics of wetland vegetation of Lake Victoria: an overview. Wetlands Ecology and Management. 2007. Vol. 15. pp. 443–451.
23. Rohwer S., Grason E., Navarro-Sigüenza A.G. Irrigation and avifaunal change in coastal Northwest Mexico: has irrigated habit attracted threatened migratory species? Peer J. 2015. No.3. e1187. DOI: 10.7717/peerj.1187.

УДК 556.535.8+556.164

[DOI: 10.46698/VNC.2022.37.47.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.37.47.009)

Оригинальная статья

Временная изменчивость поверхностного гидрохимического стока в бассейне реки Большой Егорлык в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений

А.Д. Сазонов^{1, 2}, В.Е. Закруткин¹, О.С. Решетняк²¹ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Россия, 344090, Ростовская обл., г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40, e-mail: alexei.sazonow2016@ya.ru;²Гидрохимический институт Росгидромета, Российская Федерация, 344090, Ростов-на-Дону, пр. Стачки, д. 198

Статья поступила: 15.04.2022, доработана: 19.05.2022, одобрена в печать: 24.05.2022

Резюме: Актуальность работы. В условиях недостаточного увлажнения территории роль водных ресурсов крайне важна в решении бытовых, сельскохозяйственных, рыбохозяйственных, энергетических и производственных задач. Изменчивость поверхностного гидрохимического стока рек служит индикатором процессов функционирования речного бассейна. **Цель исследования.** Целью работы являлось изучение временной изменчивости гидрохимического стока реки Большой Егорлык с учетом антропогенной составляющей и климатических изменений. **Методы исследования.** Для расчета объемов гидрохимического стока использована методика определения выноса (переноса) загрязняющих веществ с речным стоком, основанная на произведении объема стока воды и средней концентрации анализируемого вещества за определенный временной интервал. **Результаты работы.** Выполнен расчет стока главных ионов (по сумме ионов), органических веществ, биогенных элементов, тяжелых металлов за период 2003–2019 гг. Рассмотрены особенности многолетней изменчивости гидрохимического стока в бассейне реки Большой Егорлык. Особое внимание уделено влиянию климатических условий и региональных источников антропогенного воздействия на состояние водосбора и формирование химического стока реки. Анализ полученных результатов показал влияние региональных факторов на гидролого-гидрохимические процессы, происходящие в пределах речного бассейна. Показано, что ведущим фактором негативного воздействия в бассейне реки является интенсивная сельскохозяйственная деятельность и режим внесения удобрений, что вызвало возрастание стока азота нитритного и сокращение стока фосфора фосфатного. Влияние таких региональных факторов, как усиление процессов аридизации в пределах водосбора и снижение водности стало причиной значительного возрастания стока главных ионов и соединений железа. Влияние диффузного поступления отдельных компонентов в речную сеть проявилось в возрастающем тренде изменения стока соединений меди и цинка за счет истощения почвенного покрова в результате водной и ветровой эрозии. Динамика стока органических веществ и азота аммонийного не имеет четкой направленности. Наиболее выраженное превышение нормативного стока было характерно для главных ионов, азота нитритного, соединений железа и меди в бассейне реки Большой Егорлык.

Ключевые слова: река Егорлык, водный сток, гидрохимический сток, антропогенное воздействие, Ставропольский край, диффузное загрязнение, Нижний Дон, климатические изменения.

Благодарности: авторы выражают искреннюю благодарность м.н.с. ФГБУ «ГХИ» Р.С. Комарову за оказанную помощь в оформлении используемых графических материалов.

Для цитирования: Сазонов А.Д., Закруткин В.Е., Решетняк О.С. Временная изменчивость поверхностного гидрохимического стока в бассейне реки Большой Егорлык в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12(2): 117–130. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.47.009.

DOI: [10.46698/VNC.2022.37.47.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.37.47.009)

Original paper

Time variability of surface hydrochemical runoff in the Bolshoi Yegoryk River basin under anthropogenic influence and climate change

A.D. Sazonov^{1, 2}, V.E. Zakrutkin¹, O.S. Reshetnyak¹

¹Southern Federal University, 40 R. Zorge Str., Rostov-on-Don 344090, Russian Federation, e-mail: alexei.sazonow2016@ya.ru;

²Hydrochemical Institute of Roshydromet, Stachki Ave. 198, Rostov-on-Don 344090, Russian Federation

Received: 15.04.2022, revised: 19.05.2022, accepted: 24.05.2022

Abstract. Relevance. Under conditions of insufficient moisture in the territory, the role of water resources is extremely important in solving domestic, agricultural, fisheries, energy, and production tasks. The variability of the surface hydrochemical flow of rivers serves as an indicator of the processes of river basin functioning. **Aim.** The purpose of the study was to investigate the temporal variability of hydrochemical flow of the Bolshoi Yegoryk River, considering the anthropogenic component and climate change. **Methods.** To calculate the volume of hydrochemical runoff, a methodology was used to determine the removal (transport) of pollutants with river runoff, based on the product of the volume of water runoff and the average concentration of the analysed substance over a certain time interval. **Results.** The runoff of the main ions (on the sum of ions), organic substances, biogenic elements, and heavy metals for the period 2003-2019 was calculated. The peculiarities of long-term variability of hydrochemical runoff in the basin of the Bolshoi Yegoryk River are considered. Particular attention is paid to the influence of climatic conditions and regional sources of anthropogenic impact on the state of the watershed and the formation of the chemical runoff of the river. The analysis of the obtained results has shown the influence of regional facts on hydrological-hydrochemical processes within the river basin. It was shown that the leading factor of negative impact in the river basin is intensive agricultural activities and fertilizer regime, which caused the increase of nitrite nitrogen flow and reduction of phosphorus phosphate flow. The impact of regional factors such as increasing aridisation processes within the catchment area and decreasing water availability caused a significant increase in the discharge of major ions and iron compounds. The influence of diffuse inflow of certain components into the river network was manifested in an increasing trend of changes in the runoff of copper and zinc compounds due to depletion of the soil cover because of water and wind erosion. The dynamics of organic substances and ammonium nitrogen runoff has no clear direction. The most pronounced exceeding of the normative flow was characteristic of the main ions, nitrite nitrogen, iron and copper compounds in the basin of the Bolshoi Yegoryk River.

Key words: Egorlyk river, water runoff, hydrochemical runoff, anthropogenic impact, Stavropol region, diffuse pollution, lower Don River, climatic changes.

Acknowledgements: The authors would like to express their sincere gratitude to R.S. Komarov, researcher of Federal State Budgetary Institution "Hydrochemical Institute" for his assistance in the design of the graphical materials used.

For citation: Sazonov A.D., Zakrutkin V.E., Reshetnyak O.S. Time variability of surface hydrochemical runoff in the Bolshoi Yegoryk River basin under anthropogenic influence and climate change. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12(1): 117-130. DOI: [10.46698/VNC.2022.37.47.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.37.47.009).

Введение

Понимание процессов изменчивости гидролого-гидрохимических параметров речной системы, а также факторов этой изменчивости в бассейнах рек важно для разработчиков политики регионального планирования и для ученых, интересующихся гидрологическими циклами в засушливых средах и изменением климата в аридных регионах [Easterling et al., 2019; Zahmatkesh et al., 2019].

Согласно прогнозам, пустынные и полупустынные ландшафты в будущем станут крупнейшим наземным биомом на Земле, в котором уже проживает более 35% населения мира [Reynolds et al., 2007]. Рост численности населения и изменение климата оказывают значительное воздействие на водные ресурсы в аридных регионах по всему миру. В дополнение к количественному истощению водных ресурсов, здесь происходит трансформация химического состава воды рек, что представляет серьезную угрозу для сохранения и использования водных ресурсов [Borrok et al., 2014; Kingsford et al., 2006].

В пределах вододефицитных территорий водные ресурсы являются основным лимитирующим фактором сельскохозяйственного производства и поэтому большинство проектов развития и управления водными ресурсами связано прежде всего с переброской речного стока из бассейнов с избытком воды в районы с ее дефицитом [Широкова и др., 2018]. Вместе с тем современное негативное воздействие сельскохозяйственного водопользования на речные бассейны в засушливых климатических условиях с применением переброски стока изучено достаточно слабо.

С этой точки зрения бассейн реки Большой Егорлык (Егорлык) является уникальной природно-антропогенной системой, характеризующейся высокой степенью антропогенной преобразованности водосбора в условиях аридизации климата. На его территории ведется интенсивная сельскохозяйственная деятельность, осуществляется межбассейновая переброска стока, функционируют многочисленные ирригационные системы. Кроме того, в пределах речного бассейна находятся промышленные предприятия и многочисленные населенные пункты, что влечет за собой значительное антропогенное воздействие на водные ресурсы реки. Актуальность рассмотрения выбранного объекта исследования также обусловлена важной ролью водных ресурсов данного речного бассейна в решении бытовых, сельскохозяйственных, рыбохозяйственных, энергетических и производственных задач.

В качестве индикатора процессов функционирования речного бассейна был определен поверхностный гидрохимический сток, изучение которого дает представление об особенностях трансформации и перемещения веществ в водосборных бассейнах [Алекин, 1970; Savichev et al., 2005].

Характеристика бассейна реки Егорлык как объекта исследования

Река Егорлык берет начало на северо-восточном склоне г. Стрижамент и впадает в правый (западный) отсек Пролетарского водохранилища в пределах Ростовской области. Большая часть ее водосборного бассейна находится в пределах Ставропольского края. Длина реки составляет 422 км, площадь водосбора – 14600 км² [Лурье и др., 2001].

Южная часть водораздела бассейна примыкает к бассейну реки Кубань, а западная часть граничит с реками Приазовья. Восточный водораздел проходит по Западному склону Ставропольской возвышенности. Рельеф возвышенности холмистый,

на некоторых участках сильно расчленен многочисленными глубокими балками и долинами правых притоков реки. Речная сеть бассейна развита относительно слабо и состоит преимущественно из временных водотоков. Притоки в верхнем течении, берущие начало на Ставропольской возвышенности, характеризуются постоянным стоком. Ниже впадения реки Большая Кугульта рельеф представляет собой волнистую равнину, слабо понижающуюся к устью. К наиболее крупным притокам реки относятся Большая Кугульта (112 км), Калалы (111 км), Ташла (72 км), Рассыпная (62 км) (Лурье и др., 2001) (рис. 1).

Водный режим реки Егорлык значительно зависит от климатических факторов, что подтверждается полученной нами корреляционной зависимостью ($r=0,61$) между многолетними данными суммы атмосферных осадков и расходов воды на нижнем участке реки.

На территории речного бассейна наблюдаются региональные климатические изменения, характеризующиеся увеличением теплообеспеченности и существенными колебаниями влагообеспеченности, что способствует увеличению общей засушливости климата и повышению вероятности возникновения засух, суховеев и пыльных бурь [Антонов, Каторгин, 2021].

На фоне увеличения среднегодовой температуры воздуха наблюдалось сокращение годовой суммы атмосферных осадков и, соответственно, уменьшение водности реки. Отрицательные температуры воздуха начинали устанавливаться, как правило, в декабре и продолжались до апреля, часто сменяясь положительными температурами, что нарушает процесс накопления снеготазпасов.

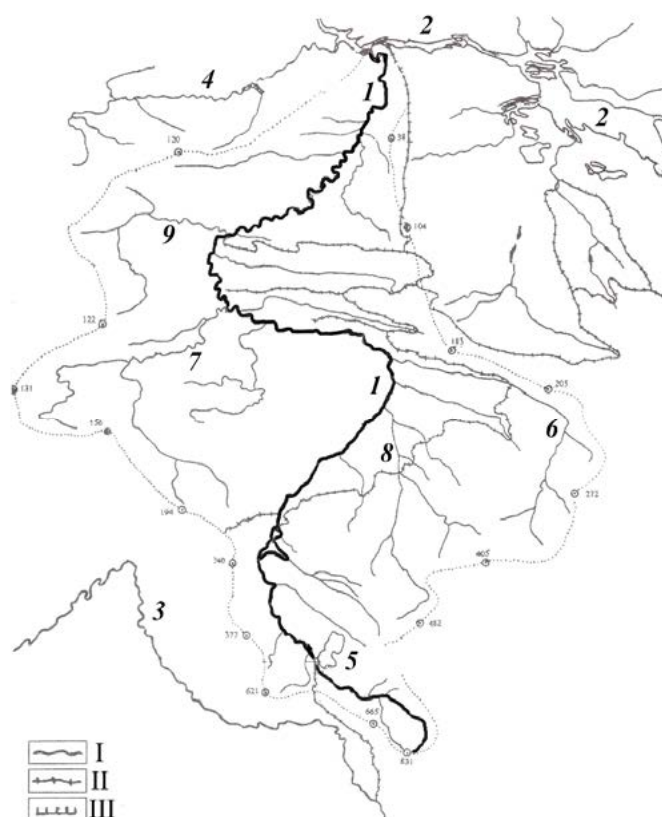


Рис. 1. Схема водосборного бассейна реки Егорлык (I – реки, II – каналы, III – плотины;

1 – р. Егорлык, 2 – Пролетарское водохранилище, 3 – р. Кубань, 4 – р. Средний Егорлык, 5 – Сengiлеевское водохранилище, 6 – Большая Кугульта, 7 – р. Калалы, 8 – р. Ташла, 9 – р. Рассыпная) [Лурье и др., 2001] /

Fig. 1. Scheme of the Egorlyk River watershed (I – rivers, II – canals, III – dams; 1 – Egorlyk River; 2 – Proletarian Reservoir; 3 – Kuban River; 4 – Middle Egorlyk River; 5 – Sengileyevskoe Reservoir; 6 – Bolshaya Kugulta; 7 – Kalaly River; 8 – Tashla River; 9 – Rasypnaya River) [Lurie et al., 2001]

Почвенный покров рассматриваемого водосбора представлен преимущественно различными подтипами черноземов (обыкновенные карбонатные, южные карбонатные, солонцеватые и др.). Наблюдается достаточно высо-

кая степень заовраженности земель и интенсивности процессов водной и ветровой эрозии в пределах бассейна реки. Большая часть территории занята пашнями [Атлас..., 2000; Экологический..., 2000]. Водный режим почв в верхнем и среднем течении реки серьезно нарушен из-за малой глубины залегания водоупора на участках подтопления, интенсивных процессов искусственного орошения и обводнения [Клюшин и др., 2011].

Для водного стока Егорлыка и некоторых его притоков характерна значительная его зарегулированность водохранилищами и многочисленными прудами; действуют несколько электростанций. Река делится на два участка, разделенных глухой земляной плотиной, полностью разделяющей верхнюю и нижнюю части реки. Верхний участок характеризуется естественным стоком. Вода реки от плотины направлена в русло реки Соломатин Яр, посредством которой сброс воды осуществляется в Сенгилеевское водохранилище, принимающее также воду из реки Кубань посредством переброски стока. Из водохранилища производится сброс воды в реку Егорлык [Лурье и др., 2001].

Переброска кубанской воды в реку существенно изменила ее гидрологический режим, что отразилось на резком увеличении водного стока и переформировании русла в виде глубинной и боковой эрозии [Лурье и др., 2001]. Оценить масштаб переброски стока крайне сложно, так как поступление воды из реки Кубань происходит непосредственно в речную сеть и расходуется на функционирование весьма изношенных оросительно-обводнительных систем (ООС) в бассейне реки Егорлык, крупнейшими из которых являются Право-Егорлыкская и Невинномысская (табл. 1). На участке от плотины Новотроицкого водохранилища до границы Ставропольского края река Егорлык фактически представляет собой региональную сбросную дренажную систему Право-Егорлыкской ООС.

Таблица 1 / Table 1

Среднегодовой объем водозабора крупнейших оросительно-обводнительных систем в пределах бассейна р. Егорлык (2013-2019 гг.) (<https://inform-raduga.ru/gts>) / Average annual water withdrawal of the largest Irrigation and drainage systems within the Egorlyk River basin (2013-2019) (<https://inform-raduga.ru/gts>)

ООС / Irrigation and drainagesystem	Объем водозабора, млн м ³ / Water withdrawal volume, mln m ³	Фактический физический износ на 2021 г., % / Real physical wear and tear as of 2021, %
Право-Егорлыкская / Pravo-Egorlykская	569	95
Невинномысская / Nevinnomysskaya	658	66
Егорлыкская / Egorlykская	70,9	100
Междуречье Кубань-Егорлыкская / Mezhdurechye Kuban-Egorlykская	12,3	70

Перераспределение кубанской воды происходит преимущественно с учетом режима орошения. На территории Ставропольского края и Ростовской области период орошения длится с мая по август, что приводит к искусственному увеличению летней доли водного стока и трансформации гидролого-гидрохимического режима реки [Лурье и др., 2001].

Из локализованных источников воздействия следует отметить многочисленные предприятия, функционирующие в непосредственной близости от водотоков бассейна реки Егорлык: АО «Невинномысский азот», АО «Арнест», ООО «Невинномысский радиаторный завод» и другие, которые относятся к крупнейшим промышленным водопользователям Ставропольского края.

В целом, воздействие природно-климатических факторов способствует долгосрочному сокращению водности реки Егорлык. Непосредственное антропогенное воздействие на гидролого-гидрохимический режим рассматриваемого бассейна определяется, прежде всего, интенсивной сельскохозяйственной деятельностью и мероприятиями, направленными на ее поддержание.

Материалы и методы исследования

При проведении исследования были использованы многолетние (2003–2019 гг.) данные наблюдений за среднесуточными расходами воды и ее химическим составом по отдельным компонентам в нижнем течении реки Егорлык в пункте наблюдений с. Новый Егорлык (32 км от устья). Данные собраны из режимно-справочных изданий Росгидромета и автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов Российского информационно-аналитического и научно-исследовательского водохозяйственного центра (<https://gmvo.skniivh.ru/>). При расчете объемов гидрохимического стока использовалась «Усовершенствованная методика определения выноса (переноса) загрязняющих веществ с речным стоком» (РД 52.24.748-2010). Вычисления производились прямым способом по формуле:

$$G = \sum_{i=1}^m W_i \bar{C}_i$$

где G – количество перенесенного вещества за расчетный период, т или тыс. т;

m – число интервалов расчетного периода;

W_i – объем стока воды за i -й интервал расчетного периода, км³;

$\bar{C}_i$ – средняя концентрация вещества за i -й интервал расчетного периода, мг/дм³.

Выполнены расчеты объемов ионного стока (по сумме главных ионов), стока органических веществ (рассчитанных по ХПК), биогенных элементов (соединений железа, кремния, фосфора, минеральных форм азота), микрокомпонентов (соединений цинка и меди). Количество определений составляло порядка 4–7 раз в год.

В данном исследовании используется понятие «нормативный сток», который представляет собой произведение предельно допустимой концентрации (Приказ Минсельхоза России от 10.12.2016 №552) определяемого компонента на значение объема годового водного стока. Значения нормативного стока могут быть полезны при сравнительных оценках гидрохимического стока и планировании хозяйственных природоохранных мероприятий на водосборе.

В процессе обработки первичных данных использованы программы «ГХМ-вынос-2019», Microsoft Office Excel 2019 и Statistica 13.3.

Результаты работы и их обсуждение

Данных о поверхностном гидрохимическом стоке в бассейне реки Егорлык крайне мало. Первые обобщения были сделаны в 60–70-х гг. и касались в основном ионного стока рек европейской части России. По данным А.О. Алекина и Л.В. Бражниковой средний за период 1936–1955 гг. показатель ионного стока с водо-

сборов левобережных притоков Нижнего Дона составлял 10–20 т/км² в год, в то время как для р. Средний Егорлык он составлял 32,2 т/км² в год (при этом ионный сток был равен 73,2 млн т/год) [Алекин, Бражникова, 1964]. Дальнейшее обобщение ионного речного стока за период 1955–1980 гг. представлено в Гидрохимическом атласе [Гидрохимический..., 1990]. Для исследуемых водосборов показатель ионного стока (модуль химического стока) увеличился и составил 50–60 т/км² в год, модуль стока органических веществ – 1–2 т/км² в год и сток соединений меди – 0–0,5 т/км² в год. Данные за этот период можно рассматривать как «фоновые» для сравнения и выявления происходящих изменений на водосборе.

Полученные нами характеристики поверхностного гидрохимического стока реки Егорлык (с. Новый Егорлык) за современный период приведены в таблице 2.

Анализ результатов расчета гидрохимического стока показывает, что, несмотря на межбассейновую переброску менее минерализованных вод из реки Кубань, ионный сток в бассейне реки Егорлык превышает модуль химического стока условно фонового периода (до активного антропогенного воздействия) в среднем в 2–6 раз. При этом показатели стока органических веществ и стока соединений меди значительно не изменились и находятся в пределах естественных колебаний.

Таблица 2 / Table 2

Характеристики поверхностного гидрохимического стока реки Егорлык (с. Новый Егорлык) / Characteristics of surface hydrochemical runoff of the Egorlyk River (Novy Egorlyk village)

Показатель, размерность / Chemical component, measuring unit	Химический сток (тыс. т или т в год) / Chemical runoff (thsd ton or ton/year)	Модуль химического стока (т/км ² /год) / Chemical runoff modulus (ton/km ² /year)
Ионный сток, тыс. т / Major ions export, thsd ton	$\frac{1559-5716}{3112}$	$\frac{107-391}{213}$
Органические вещества (по ХПК), тыс. т / Organic matter export (by COD), thsd ton	$\frac{15,6-51,4}{32,6}$	$\frac{1,07-3,52}{2,23}$
Кремний, тыс. т / Silicon, thsd ton	$\frac{1,94-8,64}{4,42}$	$\frac{0,130-0,590}{0,300}$
Азот нитратный, т / Nitrate-nitrogen, ton	$\frac{118-723}{403}$	$\frac{0,008-0,049}{0,027}$
Соединения железа, т / Iron compounds, ton	$\frac{65,8-555}{277}$	$\frac{0,004-0,038}{0,019}$
Азот аммонийный, т / Ammonium-nitrogen, ton	$\frac{73,1-312}{193}$	$\frac{0,005-0,021}{0,013}$
Фосфаты, т / Phosphates, ton	$\frac{29,2-168}{68,5}$	$\frac{0,002-0,011}{0,005}$
Азот нитритный, т / Nitrite-nitrogen, ton	$\frac{12,2-53,7}{26,1}$	$\frac{0,001-0,037}{0,002}$
Соединения цинка, т / Zinc compounds, ton	$\frac{н.о.-9,93}{4,45}$	$\frac{н.о.-0,0007}{0,0003}$
Соединения меди, т / Copper compounds, ton	$\frac{н.о.-5,42}{1,62}$	$\frac{н.о.-0,0004}{0,0001}$

Примечание: В числителе представлен диапазон значений, в знаменателе – среднее значение за период 2003–2019 гг., н.о. – ниже пределов обнаружения используемых методик. / Note: Numerator represents the range of values; denominator represents the average value. н.о. – below the detection limits of the techniques used.

Для реки Егорлык в период 2003–2019 гг. значительно превышен нормативный сток главных ионов, а также наблюдается тенденция увеличения ионного стока на фоне отсутствия устойчивого изменения водности реки (рис. 2а).

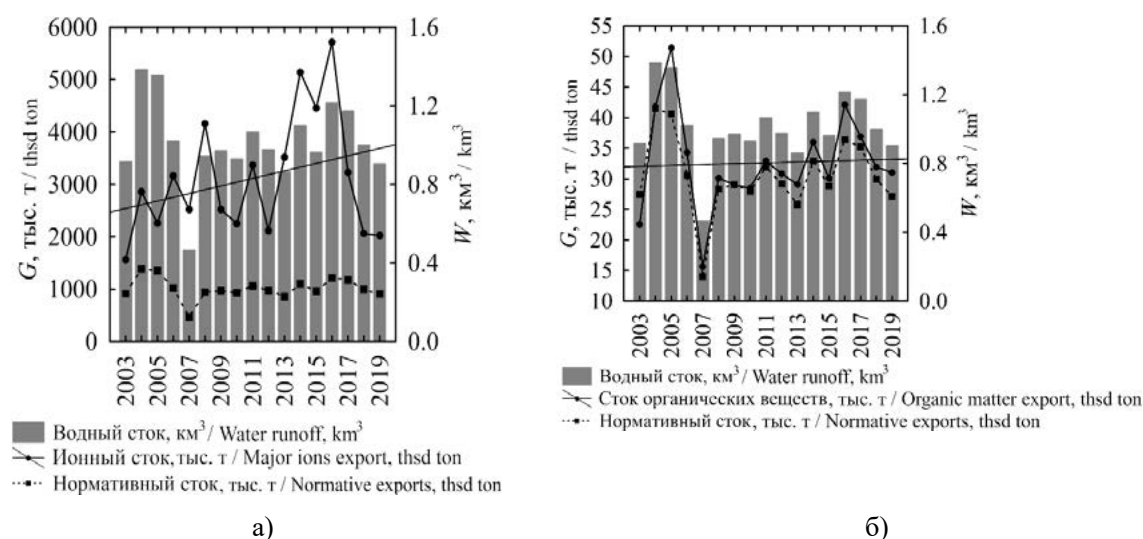


Рис. 2. Изменчивость ионного стока и стока органических веществ (по ХПК) в бассейне реки Егорлык, тыс. т /

Fig. 2. Variability of ionic runoff and organic matter runoff (by COD) in the Egorlyk River basin, thsd ton

В ионном составе воды преобладают сульфаты, что объясняется засушливыми климатическими условиями и литологическим составом пород в бассейне, которые способствуют вымыванию легкорастворимых солей сульфатов и магния [Матишов и др., 2005]. Прежде всего, это связано с наблюдаемой аридизацией в пределах речного бассейна, обусловленной увеличением среднегодовой температуры воздуха и сокращением годовой суммы атмосферных осадков. Отчетливо заметно повышение ионного стока в 2008 г. и его нормализация в 2009 г., что объясняется интенсивным растворением солей, накопленных в 2007 г. в засушливый период. Из антропогенных источников воздействия можно выделить хозяйственные обводнительно-оросительные мероприятия, которые приводят к увеличению содержания в почвах легкорастворимых минеральных солей, вызванному повышением уровня высокоминерализованных грунтовых вод [Аллабергенова, 2019; Зубков и др., 2019; Okur et al., 2020].

Сток органических веществ р. Егорлык в отличие от ионного стока показывает более значимую зависимость от водности реки, но в динамике не имеет выраженной направленности (рис. 2б). Незначительное превышение нормативного стока органических веществ, отсутствие существенных расхождений между изменчивостью водности реки и их стоком свидетельствует об устойчивости процесса поступления органических веществ в речную систему с водосборной территории, несмотря на климатические изменения и антропогенную трансформированность физико-химического состояния почв и режима грунтовых вод.

Сток биогенных компонентов является одним из ключевых факторов, определяющих биопродукционный потенциал водных объектов, поэтому его изучение имеет важное хозяйственное значение. В структуре биогенного стока, как и следо-

вало ожидать, преобладают соединения кремния (рис. 3). Сток соединений кремния имеет выраженную зависимость от водности, что свидетельствует об отсутствии заметного антропогенного воздействия на его содержание в воде.

Сток соединений железа не коррелирует с водностью и имеет отчетливый положительный тренд (рис. 3). Направленность изменчивости стока соединений железа может свидетельствовать о возрастании роли грунтовых вод в питании реки и увеличении объема сброса загрязненных вод из локализованных источников загрязнения. В ранее проведенном исследовании [Сазонов и др., 2021] выявлено увеличение содержания соединений железа в реках Западный Маныч и Сал, находящихся в аналогичных условиях засушливого климата и нарушенного режима грунтовых вод в связи с активной мелиоративной деятельностью на водосборах. Увеличение стока соединений железа в реке Егорлык вызвано аналогичными процессами. В связи с отсутствием достоверных качественных и количественных данных о сбросе загрязненных вод в бассейн реки Егорлык от точечных источников, установление их роли в формировании стока данных ингредиентов не представляется возможным.

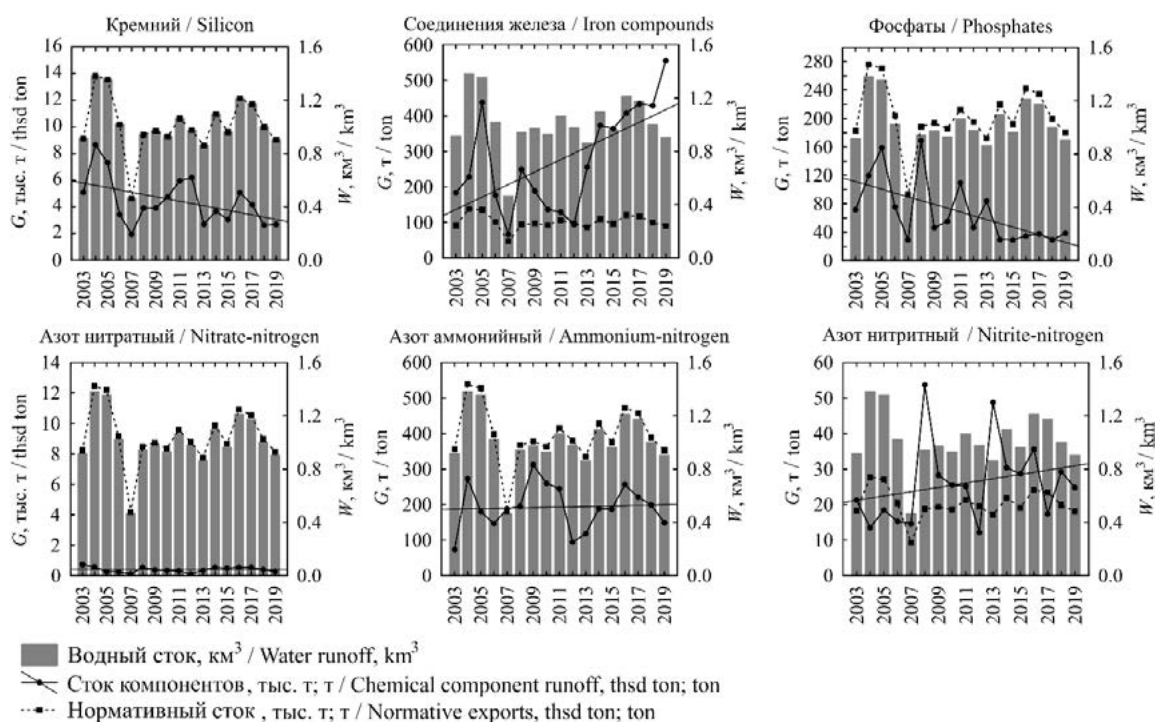


Рис. 3. Изменчивость стока биогенных веществ в бассейне р. Егорлык (т или тыс. т) /

Fig. 3. Variability of nutrient runoff in the Egorlyk River basin (ton or thousand ton)

В стоке минеральных форм азота преобладает азот нитратный, но его содержание не превышает нормативный сток. В изменении стока азота аммонийного четкой тенденции не наблюдается. Абсолютные значения стока ниже нормативных значений (кроме маловодного 2007 г.). Зависимость стока азота аммонийного от водности реки слабо выражена.

Сток фосфора фосфатного не превышает допустимый уровень и имеет отрицательный тренд, в то время как для стока азота нитритного наблюдается противоположная тенденция (рис. 3), что вызывает большой интерес.

В связи с существенной сельскохозяйственной освоенностью водосбора реки, основным источником поступления этих биогенных компонентов является вымывание из почвы внесенных азотных и фосфорных удобрений. Возрастание стока азота нитритного прежде всего обусловлено увеличением объемов вносимых в почву минеральных удобрений (табл. 3), а снижение при этом стока фосфора фосфатного происходит за счет сокращения доли использования фосфорных удобрений [Сычев и др., 2015], недостаток которых может приводить к низкой усвояемости азота сельскохозяйственными культурами и в итоге к его накоплению в почве.

В диапазоне 2007–2009 гг. (рис. 3) наблюдалось двукратное увеличение водного стока в 2008 г., которое вызвало несоизмеримое повышение стока азота нитритного в 3,8 раз, а также фосфора фосфатов – в 5,8 раз. Данное явление может быть вызвано накоплением азотных и фосфорных удобрений за счет резкого сокращения поверхностного водного стока в засушливом 2007 году.

Таблица 3 / Table 3

**Внесение минеральных удобрений на территории сельхозугодий
Ставропольского края [Сычев и др., 2021] /
Mineral fertilizer application in the Stavropol Krai farmland [Sychev et al., 2021]**

<i>Период / Period</i>	<i>Количество, кг/га / Quantity, kg/ha</i>
1996–2000	11,2
2001–2005	19,6
2006–2010	41,5
2011–2015	47,0
2016–2020	56,9

За период исследования в бассейне реки Егорлык выявлено интенсивное сокращение стока соединений цинка и меди. Зависимости стока рассматриваемых микроэлементов от водности реки не наблюдается (рис. 4).

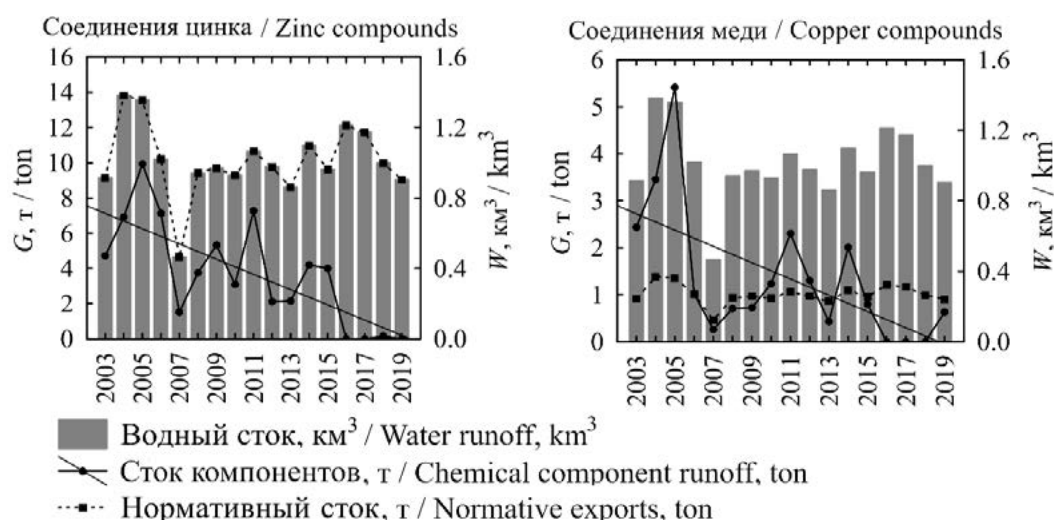


Рис. 4. Изменчивость стока микроэлементов в бассейне реки Егорлык, т /

Fig. 4. Variability of trace element runoff in the Egorlyk River basin, ton

Поверхностный водный сток считается основным источником поступления соединений меди и цинка в речные системы, причиной чему служит высокая их способность к водной миграции [Vink et al., 1999; Walaszek et al., 2018; Реутова и др., 2021]. Значительное превышение нормативного стока соединений меди в отдельные годы может быть вызвано влиянием межбассейновой переброски воды из реки Кубань, в воде которой регулярно отмечалось повышенное содержание данного компонента (до 20.0 ПДК) [Решетняк и др., 2021]. Анализ изменчивости содержания соединений цинка и меди в пахотном слое почв Ставропольского края показывает, что доля пашен со средним содержанием подвижных форм цинка сократилась в 6.6 раз, с высоким – в 13 раз, а содержание миграционных форм меди в пашнях региона в то же время понизилось примерно на 20% [Жученко и др., 2011]. Наблюдаемое уменьшение выноса с речным стоком соединений меди и цинка с водосбора реки Егорлык согласуется с тенденцией уменьшения их содержания в почвах.

Динамика изменчивости стока азота нитритного и фосфора фосфатного, соединений меди и цинка свидетельствует о преобладающей роли диффузных (площадных) источников поступления данных компонентов в реку Егорлык, о чем свидетельствуют результаты ранее проведенных исследований состояния почвенного покрова. Предполагается, что особенности применения сельскохозяйственных удобрений опосредованно влияют на разнонаправленные тренды стока фосфора фосфатного и азота нитритного. В то же время процессы водной и ветровой эрозии на водосборе (то есть обеднение почв отдельными микроэлементами) опосредованно воздействуют в сторону сокращения стока соединений меди и цинка.

ВЫВОДЫ

Основываясь на результатах проведенных исследований, можно сделать следующие выводы.

1. Положительная направленность динамики стока главных ионов и соединений железа свидетельствуют об увеличении роли грунтовых вод в питании реки и засолении почв, что, в свою очередь, вызвано процессами аридизации, снижением водности реки и функционированием обводнительно-оросительных систем в бассейне р. Егорлык.

2. Выявлена четкая зависимость стока органических веществ и соединений кремния от водности реки, что обусловлено доминированием природных источников их поступления в бассейне реки Егорлык.

3. Возрастание стока азота нитритного и сокращение стока фосфора фосфатного вызвано, прежде всего, особенностями применения удобрений: на исследуемой территории отмечено увеличение использования азотных удобрений на фоне сокращения применения фосфатных удобрений.

4. Выявлена тенденция снижения стока соединений меди и цинка, обусловленная истощением почв в результате водной и ветровой эрозии. Это может свидетельствовать о преобладающей роли диффузного поступления перечисленных компонентов в речную сеть.

Таким образом, в бассейне реки Егорлык за период исследования наблюдалось заметное увеличение стока главных ионов, соединений железа и азота нитритного на фоне сокращения стока кремния, фосфора фосфатного, соединений меди и цинка. Наиболее выраженное превышение нормативного стока было характерно для главных ионов, азота нитритного, соединений железа и меди.

Литература

1. Алекин О.А., Бражникова Л.В. Сток растворенных веществ с территории СССР. – М.: Наука, 1964. – 144 с.
2. Алекин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 417 с.
3. Аллабергенова Э.М. Некоторые гидрологические аспекты опустынивания Ногайского района Республики Дагестан. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. №4. – С. 6–12. DOI 10.23671/VNC.2019.4.44484.
4. Антонов С.А., Каторгин И.Ю. Картографирование характеристик изменения климата в Ставропольском крае. // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2021. – Т. 27. №3. – С. 171–182. DOI 10.35595/2414-9179-2021-3-27-171-182.
5. Атлас земель Ставропольского края. – Ставрополь, 2000. – 118 с.
6. Гидрохимический атлас СССР. / Под ред. А.М. Никанорова. – М.: Гидрометеиздат, 1990. – 110 с.
7. Жученко А.А., Трухачев В.И., Пенчуков В.М., Сотченко В.С., Агеев В.В., Ангилев О.Г., Баринцева В.Н., Войсковой А.И., Власова О.И., Гребенников В.Г., Дорожко Г.Р., Дридигер В. К., Есаулко А.Н., Жукова М.П., Зеленская Т.Г., Злыднев Н.З., Злыднева Р.М., Лобанкова О.Ю., Передериева В.М., Полоус Г.П., Подколзин А.И., Раков А.Ю., Сентябрьев А.А., Сирота М.А., Цховребов В.С., Шабалдас О.Г. Системы земледелия Ставрополья. – Ставрополь: АГРУС, 2011. – 844 с.
8. Зубков Е.А., Гарькуша Д.Н., Барцев О.Б., Никаноров А.М. Грунтовые воды юга Ростовской области и их влияние на подтопление территорий населенных пунктов. – Ростов н/Д.: ЮФУ, 2019. – 184 с.
9. Ключин П.В., Марьин А.Н. Антропогенное переувлажнение и заболачивание ландшафтов Ставропольского края. // Юг России: экология, развитие. – 2011. – №2. – С. 80–86.
10. Лурье П.М., Панов В.Д., Саломатин А.М. Река Маныч: гидрография и сток. – СПб.: Гидрометеиздат, 2001. – 160 с.
11. Матишов Д.Г., Гаргопа Ю.М. Формирование гидролого-гидрохимического режима водоемов Маныча. // Маныч-Чограй: история и современность (предварительные исследования) / Отв. ред. Г.Г. Матишов. – Ростов н/Д.: Эверест, 2005. – С. 20–36.
12. 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. – №3. – С. 172–184. DOI 10.46698/VNC.2021.20.60.014.
13. Решетняк О.С., Комаров Р.С. Тенденции изменчивости химического состава и степени загрязненности воды реки Кубань. // Вода и экология: проблемы и решения. – 2021. – №1. – С. 30–40. DOI: 10.23968/2305-3488.2021.26.1.30-40
14. Сазонов А.Д., Решетняк О.С., Закруткин В.Е. Изменчивость гидрохимических характеристик рек Сал и Западный Маныч в условиях современного антропогенного воздействия и климатических изменений (в пределах Ростовской области). // Наука Юга России. – 2021. – № 1. – С. 24–36. DOI: 10.7868/S25000640210103.
15. Сычев В.Г., Гречишкина Ю.И., Бурлай А.В., Матвиенко А.В. Анализ использования минеральных удобрений под озимую пшеницу в Ставропольском крае. // Плодородие. – 2021. – №2. – С. 3–6. DOI: 10.25680/S19948603.2021.119.01
16. Сычев В.Г., Есаулко А.Н., Агеев В.В., Подколзин А.И., Сигида М.С. Особенности применения систем удобрений под сельскохозяйственные культуры в Ставропольском крае. // Вестник АПК Ставрополья. – 2015. – №2. – С. 53–66.
17. Широкова В.А., Александровская О.А., Лихачева Э.А. Проблемы водных ресурсов и водопользования в аридных районах на примере древнего и современного Израиля. // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – №3. – С. 75–93. DOI: 10.23671/VNC.2018.3.16549.
18. Экологический атлас Ростовской области. / Глав. ред. В.Е. Закруткин. Ростов н/Д.: СКНЦВШ, 2000. – 120 с.
19. Borrok D.M., Engle M.A. The role of climate in increasing salt loads in dryland rivers. //

- Journal of arid environments. – 2014. – Vol. 111. – pp. 7-13. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2014.07.001
20. Easterling W.E., Riebsame W.E. Assessing drought impacts and adjustments in agriculture and water resource systems. // *Planning for Drought*. – Routledge. – 2019. – pp. 189-213.
21. Kingsford R.T., Thompson J.R. Desert of dryland rivers of the world –an introduction. // *Ecology of desert rivers*. Cambridge University Press. – 2006. – pp. 3-10.
22. Okur B., Örcen N. Soil salinization and climate change // *Climate change and soil interactions*. / Prasad M., Pietrzykowski M. (eds.). Elsevier. – 2020. – pp. 331-350.
23. Reynolds J.F. Global desertification: building a science for dryland development. // *Science*. – 2007. – Vol. 316. Iss. 5826. – pp. 847-851. DOI: 10.1126/science.1131634
24. Savichev O.G., Mazurov A.K., Pipko I.I., Sergienko V.I., Semiletova I.P. Spatial patterns of the evolution of the chemical composition and discharge of river water in the Ob river basin. // *Doklady Earth Sciences*. – 2016. – Vol. 466. – No. 1. – pp. 59–63. DOI: 10.1134/S1028334X16010141
25. Vink R., Behrendt H., Salomons W. Development of the heavy metal pollution trends in several European rivers: an analysis of point and diffuse sources. // *Water Science and Technology*. – 1999. – Vol. 39. Iss. 12. – pp. 215-223. DOI: 10.1016/S0273-1223(99)00338-8
26. Walaszek M., Del Nero M., Bois P., Ribstein L., Courson O., Wanko A., Laurent J. Sorption behavior of copper, lead and zinc by a constructed wetland treating urban stormwater. // *Applied Geochemistry*. – 2018. – Vol. 97. – pp. 167-180. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2018.08.019
27. Zahmatkesh Z., Kumar J.S., Coulibaly, P., Stadnyk, T. An overview of river flood forecasting procedures in Canadian watersheds. // *Canadian Water Resources Journal*. / *Revue Canadienne des ressources hydriques*. – 2019. – Vol. 44. No.3. – pp. 213-229.

References

1. Alekin O.A., Brazhnikova L.V. Drainage of dissolved substances from the territory of the USSR. Moscow. Nauka, 1964. 144 p. (In Russ.)
2. Alekin O.A. Fundamentals of hydrochemistry. Leningrad. Gidrometeoizdat, 1970. 417 p. (In Russ.)
3. Allabergenova E.M. Some hydrological aspects of desertification in the Nogai region of the Republic of Dagestan. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2019. Vol. 9. No.4. pp. 6–12. DOI 10.23671/VNC.2019.4.44484. (In Russ.)
4. Antonov S.A., Katorgin I. Yu. Mapping the characteristics of climate change in the Stavropol Territory. *InterCarto. InterGIS*. 2021. Vol. 27. No. 3. pp. 171–182. (In Russ.) DOI 10.35595/2414-9179-2021-3-27-171-182.
5. Atlas of the lands of the Stavropol Territory. Stavropol, 2000. 118 p. (In Russ.)
6. Hydrochemical Atlas of the USSR. Ed. A.M. Nikanorov. Moscow. Gidrometeoizdat, 1990. 110 p. (In Russ.)
7. Zhuchenko A.A., Trukhachev V.I., Penchukov V.M., Sotchenko V.S., Ageev V.V., et al. Farming systems of the Stavropol region. Stavropol, AGRUS, 2011. 844 p. (In Russ.)
8. Zubkov E.A., Garkusha D.N., Bartsev O.B., Nikanorov A.M. Ground waters of the south of the Rostov region and their influence on the flooding of the territories of settlements. Rostov-on-Don. SFU, 2019. 184 p. (In Russ.)
9. Klyushin P.V., Maryin A.N. Anthropogenic waterlogging and bogging of the landscapes of the Stavropol Territory. *South of Russia: ecology, development*. 2011. No. 2. pp. 80–86. (In Russ.)
10. Lurie P.M., Panov V.D., Salomatin A.M. The Manych River: hydrography and runoff. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat, 2001. 160 p. (In Russ.)
11. Matishov D.G., Gargopa Yu.M. Formation of the hydrological and hydrochemical regime of the Manych reservoirs. *Manych-Chogray: history and modernity (preliminary research)*. Rostov-on-Don. Everest, 2005. pp. 20–36. (In Russ.)
12. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M. Microelement composition of surface waters of the Malka river basin and geochemical features of the region. *Geology*

and geophysics of the South of Russia. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 172-184. DOI 10.46698/VNC.2021.20.60.014. (In Russ.)

13. Reshetnyak O.S., Komarov R.S. Trends in the variability of the chemical composition and degree of water pollution in the Kuban River. Water and ecology: problems and solutions. 2021. No. 1. pp. 30–40. (In Russ.) DOI: 10.23968/2305-3488.2021.26.1.30-40.

14. Sazonov A.D., Reshetnyak O.S., Zakrutkin V.E. Variability of the hydrochemical characteristics of the Sal and Western Manych rivers under the conditions of modern anthropogenic impact and climate change (within the Rostov region). Science in the South Russia. 2021. No. 1. pp. 24–36. (In Russ.) DOI: 10.7868/S25000640210103.

15. Sychev V.G., Grechishkina Yu.I., Burlai A.V., Matvienko A.V. Analysis of the use of mineral fertilizers for winter wheat in the Stavropol Territory. Plodorodie. 2021. No. 2. pp. 3–6. (In Russ.) DOI: 10.25680/S19948603.2021.119.01.

16. Sychev V.G., Esaulko A.N., Ageev V.V., Podkolzin A.I., Sigida M.S. Features of the use of fertilizer systems for agricultural crops in the Stavropol Territory. Agricultural Bulletin of Stavropol Region. 2015. No. S2. pp. 53–66. (In Russ.)

17. Shirokova V.A., Alexandrovskaya O.A., Likhacheva E.A. Problems of water resources and water use in arid regions on the example of ancient and modern Israel. Geology and geophysics of the South of Russia. 2018. No. 3. pp. 75–93. DOI: 10.23671/VNC.2018.3.16549.

18. Ecological atlas of the Rostov region. Ed. V.E. Zakrutkin. Rostov-on-Don. SKNTsVSH, 2000. 120 p. (In Russ.)

19. Borrok D.M., Engle M.A. The role of climate in increasing salt loads in dryland rivers. Journal of arid environments. 2014. Vol. 111. pp. 7-13. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2014.07.001.

20. Easterling W.E., Riebsame W.E. Assessing drought impacts and adjustments in agriculture and water resource systems. Planning for Drought. Routledge. 2019. pp. 189–213.

21. Kingsford R.T., Thompson J.R. Desert of dryland rivers of the world –an introduction. Ecology of desert rivers. Cambridge University Press. 2006. pp. 3–10.

22. Okur B., Örcen N. Soil salinization and climate change. Climate change and soil interactions. Prasad M., Pietrzykowski M. (eds.). Elsevier. 2020. pp. 331–350.

23. Reynolds J.F. Global desertification: building a science for dryland development. Science. 2007. Vol. 316. Issue 5826. pp. 847–851. DOI: 10.1126/science.1131634.

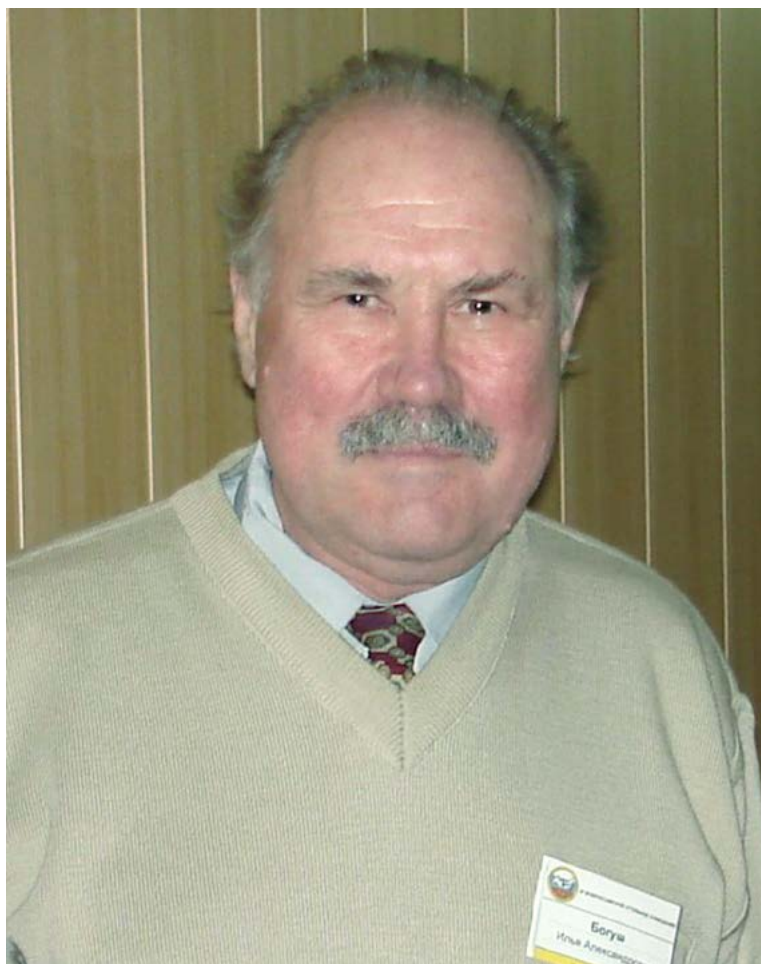
24. Savichev O.G., Mazurov A.K., Pipko I.I., Sergienko V.I., Semiletova I.P. Spatial patterns of the evolution of the chemical composition and discharge of river water in the Ob river basin. Doklady Earth Sciences. 2016. Vol. 466. No. 1. pp. 59–63. DOI: 10.1134/S1028334X16010141

25. Vink R., Behrendt H., Salomons W. Development of the heavy metal pollution trends in several European rivers: an analysis of point and diffuse sources. Water Science and Technology. 1999. Vol. 39. Issue 12. pp. 215–223. DOI: 10.1016/S0273-1223(99)00338-8.

26. Walaszek M., Del Nero M., Bois P., Ribstein L., Courson O., Wanko A., Laurent J. Sorption behavior of copper, lead and zinc by a constructed wetland treating urban stormwater. Applied Geochemistry. 2018. Vol. 97. pp. 167–180. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2018.08.019

27. Zahmatkesh Z., Kumar J.S., Coulibaly P., Stadnyk T. An overview of river flood forecasting procedures in Canadian watersheds. Canadian Water Resources Journal. Revue Canadienne des ressources hydriques. 2019. Vol. 44. No.3. pp. 213-229.

ПАМЯТЬ

Илья Александрович Богуш**(1935-2022)**

Илья Александрович окончил Новочеркасский политехнический институт в 1958 году, после чего начал свою трудовую деятельность в Оренбургском геологическом управлении, где работал коллектором, геологом и в последствие начальником отдела. Уже через пару лет он серьезно увлекся наукой, и с 1961 года связал свою судьбу с Новочеркасским политехническим институтом, где в этот же год поступил в аспирантуру.

Практический опыт в геологии и стремление познать новое в области минералогии позволили И.А. Богушу в кратчайший срок защитить кандидатскую и в скорости докторскую диссертации. Учитывая высокий уровень знаний в области геологических наук, а также его авторитет, как ученого-практика, руководство университета приняло решение утвердить И. А. Богуша в качестве заведующего кафедрой общей и исторической геологии, минералогии и петрографии. Эту кафедру он возглавлял с 1992 по 2011 годы!

Заслуги И.А. Богуша в подготовке кадров, развитии науки и техники неоднократно отмечались правительственными наградами: медалью к ордену «За заслуги перед Отечеством» 2-й степени, нагрудным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования России», «Отличник разведки недр», «Заслуженный профессор ЮРГТУ (НПИ)». Ему присвоены почетные звания «Заслуженный работник высшей школы РФ» и «Заслуженный деятель науки Российской Федерации».

Приказом ректора ЮРГТУ (НПИ) от 03.06.2020 г. № 248-0 профессору Богушу было присвоено звание «Лауреат премии имени Н.Н.Зинина» - «За значительный вклад в развитие научного потенциала вуза, достижения в разработке и развитии существующих и создании новых теорий и оригинальных методов исследований в области наук о Земле, внедрение передовых научных разработок в производство и в связи с 85-летием».

Он также широко известен научной общественности как специалист в области металлогении и минералогии месторождений полезных ископаемых, является автором более 400 научных работ, в том числе 6 монографий и 5 учебников и учебных пособий.

Научные разработки И.А. Богуша стали теоретической основой генетической и онтогенетической минералогии, были применены в геологии рудных месторождений. Фактически в университете им было создано новое направление исследований и новая научно-педагогическая школа минералофизики. Многолетние минералофизические исследования колчеданных руд Урала и Кавказа привели к созданию теории онтогенеза месторождений и разработке параметрических поисковых критериев и количественного прогноза колчеданного оруденения.

Более 20 лет профессор И.А. Богуш возглавлял исследования благородного оруденения (золото, платиноиды) Северного Кавказ. Результатом этих работ является установление перспектив Северного Кавказа как новой продуктивной черносланцевой провинции России!

Илья Александрович был человеком неравнодушным, с активной гражданской позицией. Он принимал участие в ФЦП «Экологическая безопасность России» в качестве научного руководителя исследований экологически неблагоприятных урбанизированных территорий. Его опыт минералого-геохимического анализа природных объектов, примененный для исследований окружающей среды Новочеркасска, позволил обосновать новую методику комплексной оценки городов с высокой степенью экологической напряженности.

Илья Александрович также был известен как общественный деятель и проводник геолого-минералогических знаний. Длительное время он возглавлял Северо-Кавказское отделение Российского минералогического общества, являлся директором геологического музея университета.

И.А. Богуш был действительным членом российской Академии естественных наук (РАЕН), Международной академии высшей школы, до последнего он с завидным энтузиазмом передавал свои знания студенческой молодежи, руководил аспирантами, организовывал полевые экспедиции и сам принимал в них участие!

В сердцах политехников он навсегда останется талантливым ученым, учителем, безмерно преданным своему делу, человеком широкой души, другом, товарищем, наставником!

Искренние соболезнования родным, близким Ильи Александровича и всем, кто знал и ценил этого замечательного человека и талантливого ученого.

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 A4. 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 $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, const , $\sin$, $\cos$, $\min$, $\max$ и т.п. набираются прямым шрифтом. Символ не должен сливаться с надсимвольным элементом в химических элементах (H_2O) и единицах измерений (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 (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 $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, $\cos$, $\sin$, $\min$, $\max$, etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements (H_2O) and measurement units (MW/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 ν , 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
(№2. 2022 г. Том 12)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 01.07.2022 г. Формат 60×84 1/8.

Дата фактического выхода 11.07.2022 г.

Усл. печ. лист 15,0. Гарнитура «Times».

Бумага офсетная. Печать цифровая. Тираж 100 экз. Заказ № 72.

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