

ISSN 2221-3198

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 1 / 2023



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 13
№ 1 / 2023**

Владикавказ 2023

**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**, Высокотемпературный 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:

363110, РСО-Алания, Пригородный район,
с. Михайловское, ул. Вильямса, 1
Тел.: 8(8672)726788
e-mail: info@vncran.ru
http://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, 2023

Фото на обложке – Свято-Троицкая церковь. Село Горная Саниба (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 Center,
RAS, Vladikavkaz

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

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

Founder address

1 Williamsa Str., Mikhailovskoe,

Prigorodny district,

RNO-Alania, 363110, Russia

Tel.: 8(8672)726788

e-mail: info@vncran.ru

http://vncran.ru

Publisher:

**Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Centre
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, 2023

Cover photo – Holy Trinity Church. Gornaya Saniba village (K.S. Kharebov)

СОДЕРЖАНИЕ

===== ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ =====	
Газеев В.М., Гурбанов А.Г.	
Ранне-среднедевонские вулканогенные породы из районов колчеданных месторождений Передового хребта Большого Кавказа: геодинамическая типизация и минерагения	6
===== ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА =====	
Етирмишли Г.Д., Казымова С.Э.	
Извержение грязевого вулкана «Локбатан»	22
Попков В.И., Попков И.В.	
Складчато-надвиговые дислокации в триасовых отложениях Скифско-Туранской платформе	34
Стасенко А.А., Данилин М.Н., Харченко В.М., Неркарарян А.Е.	
Геоморфологическое, геолого-тектоническое строение, геодинамические и экологические условия горы Машук и примыкающей территории центральной части района Кавказских Минеральных Вод	47
===== ГЕОФИЗИКА =====	
Фидарова М.И., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А.	
Связь величины макросейсмической интенсивности с различными показателями инструментальных записей колебаний грунтовой толщи	59
Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л.	
Сейсмотектоника южной части Центрального сегмента Большого Кавказа	76
===== ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ =====	
Гусев А.И.	
Высоко-фракционированные гранитоиды Пшишского редкометалльного рудного поля Северного Кавказа	97
Парада С.Г.	
Платина и платиноиды в палеозойских черносланцевых толщах Передового хребта (Северный Кавказ)	112
Январёв Г.С., Бобмуротов Б.Б.	
Объемная цифровая модель глубоких горизонтов Главной рудной залежи Урупского медно-колчеданного месторождения	125
===== ГИДРОГЕОЛОГИЯ =====	
Исламзаде А.В., Маммадов П.Я.	
Оценка ресурсов термальных вод Прикаспийско-Кубинского региона и методика их использования	136
===== ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГЕОМЕХАНИКА =====	
Акопян В.Ф., Языев Б.М., Чепурненко А.С.	
Расчет устойчивости грунтовых откосов при помощи методов нелинейной оптимизации	150
===== ГЕОИНФОРМАТИКА =====	
Пховелишвили М.Г., Арчвадзе Н.Н., Николеишвили М.М.	
Анализ моделей прогнозирования землетрясений для получения наилучшей модели	162

CONTENTS

===== GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY =====	
Gazeev V.M., Gurbanov A.G.	
Early-Middle Devonian volcanic rocks from areas of massive sulfide deposits of the Front Range of the Greater Caucasus: geodynamic typification and minerageny	6
===== GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS =====	
Yetirmishli G.J., Kazimova S.E.	
Eruption of the mud volcano "Lokbatan"	22
Popkov V.I., Popkov I.V.	
Dislocations of lateral compression in the cover of the Scythian-Turan platform (on the example of the Eastern Mangyshlak).....	34
Stasenko A.A., Danilin M.N., Kharchenko V.M., Nerkararian A.E.	
Geomorphological, geological and tectonic structure, geodynamic and ecological conditions of Mount Mashuk and the adjacent territory of the central part of the Caucasus Mineralnye Vody region	47
===== GEOPHYSICS =====	
Fidarova M.I., Zaalishvili V.B., Melkov D.A.	
Correlation between the magnitude of macroseismic intensity and various indicators of instrumental records of fluctuations in the soil stratum.....	59
Stogny V.V., Stogny G.A., Ponomareva N.L.	
Seismotectonics of the southern part of the Greater Caucasus Central segment	76
===== GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, ===== MINERAGENY	
Gusev A.I.	
Early High-fractionation granitoids of Pschish rare metal of district the Northern Caucasus.....	97
Parada S.G.	
Platinum and platinoids in Paleozoic Black Shale strata of the Front Ridge (North Caucasus)	112
Yanvarev G.S., Bobomurotov B.B.	
Volumetric digital model of deep horizons of the Main ore deposit of the Urupsky copper-crusted deposit	125
===== HYDROGEOLOGY =====	
Islamzade A.V., Mammadov P.Y.	
Assessment of thermal water resources of Precaspian-Guba district and methodology of its use	136
===== GEOTECHNOLOGY. GEOMECHANICS =====	
Акopyan V.F., Yazyev B.M., Chepurnenko A.S.	
Calculation of soil slope stability using nonlinear optimization methods.....	150
===== GEOINFORMATICS =====	
Pkhovelishvili M.G., Archvadze N.N., Nikoleishvili M.M.	
Analysis of earthquake prediction models to obtain the best model.....	162

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 552.323.5

DOI: [10.46698/VNC.2023.29.60.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.29.60.001)

Оригинальная статья

Ранне-среднедевонские вулканогенные породы из районов колчеданных месторождений Передового хребта Большого Кавказа: геодинамическая типизация и минерагения

В.М. Газеев ^{1, 2}, А.Г. Гурбанов ^{1, 2}

¹Институт геологии рудных месторождений петрографии, минералогии и геохимии
Российской академии наук, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35,
e-mail: gurbanov@igem.ru;

²Владикавказский научный центр Российской академии наук, Россия, 363110,
РСО-Алания, Пригородный район, с. Михайловское, ул. Вильямса, 1,
e-mail: gazeev@igem.ru

Статья поступила: 24.01.2023, доработана: 21.02.2023, одобрена в печать: 01.03.2023

Резюме: Актуальность работы. В южной части Скифской плиты, в структурно-формационной зоне (СФЗ) Передового хребта (ПХ) Большого Кавказа (БК), известны ранне-среднедевонские вулканические образования, с которыми ассоциируют колчеданные месторождения Урупского района, а также месторождения Бесскесское, Быковское, Даутское, Худесское и многочисленные рудопроявления. Петролого-геохимические исследования девонских вулканитов позволяют уточнить особенности геодинамического развития БК в это время. **Целью исследования** является расшифровка геодинамической позиции вулканических пород раннего и среднего девона ПХ БК и уточнение их минерагенической специализации. **Методы.** Объектом исследований выбраны эффузивные породы Даутской и Кызылкольской свит, распространенные в зоне ПХ БК, в пределах Кызылкольского тектонического покрова, в междуречье рек Большая Лаба, Маруха, Кубань, Малка. **Результаты исследования.** Установлено, что вулканогенные породы Кызылкольской свиты – базальты, андезиты, дациты, риолиты являются известково-щелочными образованиями. Вулканиды Даутской свиты (базальты, андезибазальты, риолиты) – породы толеитовой серии. Показано, что среди вулканитов основного состава присутствуют две разновидности базальтов *Na* и *K-Na*. Предполагается, что наблюдаемые различия базальтов связаны с разной степенью плавления исходных «шпинелевых» перидотитов и разной степенью зараженности их субдукционной компонентой. Вулканиды кислого состава (риолиты, дациты) высокоглиноземистые образования с *K-Na* и *Na* типом щелочности ($Na_2O/K_2O=1,5-121$). По петрохимическим показателям риолиты близки к гранитам толеитового ряда и гранитам *M-type*. Их тесная ассоциация с базальтами свидетельствует о том, что они являются дифференциатами основных толеитовых расплавов. Отмечено, что девонские колчеданные месторождения ПХ несут в себе промышленное оруденение *Cu*, *Zn*, *Au*, *Ag* платиноидов и других металлов. По структурно – генетическим признакам здесь выделяются два основных типа – «урупский» (*Cu-Zn*) и «худесский» (*Cu-Co*). Установлено, что в раннем – среднем девоне на северной окраине Палеотетиса в зоне БК имел место островодужный процесс, осложненный внутридуговым рифтингом.

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

Благодарности: Работа выполнена в рамках Госзадания ИГЕМ РАН, рег. № 121041500222-4 и Госзадания КНИО ВНЦ РАН, рег. № АААА-А19-119040190054-8.

Для цитирования: Газеев В.М., Гурбанов А.Г. Ранне-среднедевонские вулканогенные породы из районов колчеданных месторождений Передового хребта Большого Кавказа: геодинамическая типизация и минерогения. Геология и геофизика Юга России. 2023. 13(1): 6-21. DOI: 10.46698/VNC.2023.29.60.001.

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

DOI: [10.46698/VNC.2023.29.60.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.29.60.001)

Original paper

Early-Middle Devonian volcanic rocks from areas of massive sulfide deposits of the Front Range of the Greater Caucasus: geodynamic typification and minerageny

V.M. Gazeev^{1, 2}, A.G. Gurbanov^{1, 2}

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

Received: 24.01.2023, revised: 21.02.2023, accepted: 01.03.2023

Abstract: Relevance. In the southern part of the Scythian plate, in the structural-formational zone (SFZ) of the Peredovoi Ridge (PR) of the Greater Caucasus (GC), Early-Middle Devonian volcanic formations are known, with which pyrite deposits of the Urupsky region are associated, as well as deposits of Besskesskoe, Bykovskoe, Dautskoe, Khudesskoe and numerous ore manifestations. Petrological and geochemical studies of Devonian volcanics are necessary to clarify the features of the geodynamic development of the GC region during this period. **The aim of the study** is to decipher the geodynamic position of the Early and Middle Devonian volcanic rocks of the PR GC and to clarify their mineragenic specialization. **Methods.** The object of research is the effusive rocks of the Dautskaya and Kyzylkolskaya suites, which are common in the zone of the PR GC, within the Kyzylkolsky tectonic cover, in the interfluvium of the Bolshaya Laba, Marukha, Kuban, and Malka rivers. **Results.** It has been established that the volcanogenic rocks of the Kyzylkol suite – basalts, andesites, dacites, rhyolites – are calc-alkaline formations. Volcanites of the Dautskaya suite (basalts, andesite-basalts, rhyolites) are rocks of the tholeiitic series. It is shown that among the mafic volcanics there are two varieties of Na and K-Na basalts. It is assumed that the observed differences in basalts are associated with different degrees of melting of the original “spinel” peridotites and different degrees of contamination with the subduction component. Acid volcanites (rhyolites, dacites) are high-alumina formations with K-Na and Na alkalinity types ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=1.5-121$). In terms of petrochemical parameters, rhyolites are close to tholeiitic granites and M-type granites. Their close association with basalts indicates that they are differentiates of basic tholeiitic melts. It is noted that the Devonian pyrite deposits of PR contain industrial mineralization of Cu, Zn, Au, Ag, platinumoids and other metals. According to structural and genetic features, two main types are distinguished here – “Urupsky” (Cu-Zn) and “Khudessky” (Cu-Co). It has been established that in the Early – Middle Devonian on the northern margin of the Paleo-Tethys in the GC zone, an island-arc process, complicated by intra-arc rifting, took place.

Keywords: petrography, geochemistry, geodynamic typification, minerageny.

Acknowledgments: This work was conducted in the framework of budgetary funding of IGEN RAS reg. No. 121041500222-4 and KNIO VSC RAS reg. No. AAAA-A19-119040190054-8.

For citation: Gazeev V.M., Gurbanov A.G. Early-Middle Devonian volcanic rocks from areas of massive sulfide deposits of the Front Range of the Greater Caucasus: geodynamic typification and minerageny. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(1): 6-21. DOI: 10.46698/VNC.2023.29.60.001.

Введение

Петролого-геохимическое изучение вулканогенных пород, сформировавшихся в раннем-среднем девоне, распространенных в структурно-формационной зоне (СФЗ) Передового хребта (ПХ) Большого Кавказа (БК), является актуальной проблемой. Данные породы вмещают месторождения колчеданных руд Урупского района (Урупское, Власенчихинское, Первомайское, Скалистое), а также месторождения Бесскесское, Быковское, Даутское, Худесское, многочисленные рудопроявления и зоны пиритизации. Целью исследования является изучение вулканитов ранне-среднедевонского возраста, СФЗ ПХ БК в районах распространения колчеданных месторождений. Уточнение их геохимических особенностей и минерагенической специализации, а также геодинамической позиции. Объектами для исследования выбраны эффузивные породы Даутской и Кызылкольской свит, распространенных в пределах Кызылкольского тектонического покрова ПХ БК. Даутская свита (ДС) развита в Бесскесско-Кольтюбинской СФЗ, где залегает в основании разреза пород Урупской серии. В стратотипе, по р. Даут, нижняя часть разреза ДС (до 400 м) сложена эффузивами базальтового и андезитового составов, с прослоями туффитов и туфов. Верхняя часть ДС (до 700 м) имеет более разнообразный состав. Преобладают кислые эффузивы (риолиты, риодациты и их туфы), в меньших количествах присутствуют базальты, и туфы основного состава. На породах ДС согласно залегают филлиты, туфы, андезитовые порфириды и известняки Пцицерской свиты, а выше них туфы, песчаники, сланцы и известняки Семиродниковской свиты. В Урупском районе ДС представлена (снизу вверх): – лавами основного состава (более 200 м); толщей чередования базальтов с андезитами и дацитами (до 340 м); гематитизированными лавами основного состава (до 280 м); толщей чередования лав кислого и основного составов с туфами, яшмами и кремнистыми сланцами, (до 120 м). Общая мощность свиты более 1000 м. Во многих местах породы ДС претерпели зеленокаменное перерождение, в условиях альбит-хлоритовой субфации фации зеленых сланцев [Семенуха и др., 2009; Лупанова, 1975]. Кызылкольская свита (КС) распространена в Карджюрской СФЗ, где она залегает в основании разреза пород Карачаевской серии. В стратотипе свиты по рр. Чемарткол, Тохана, Кызылкол выделяют две ее части. Нижняя (до 1750 м), характеризуется преобладанием лав основного и реже среднего состава с прослоями яшм, алевролитов. Верхняя (до 1600 м) – образована лавами различного состава, переслаивающимися с пирокластическими и осадочными породами. На породах КС наращивая её разрез залегают туфы, аргиллиты, конгломераты, песчаники Эльмезтютюбинской свиты, а выше залегают осадочные породы Карджюрской свиты [Письменный и др., 2004]. Повсеместно нижняя граница ДС и КС тектоническая (рис. 1). Отмечается, что в верхней части разреза появляются базальтовые порфиры, обогащенные калием [Аджирей и др., 1976; Лупанова, 1975]. Возраст пород ДС и КС на основании находок радиолярий: и конодонтов: определяется как ранне – среднедевонский. Ряд исследователей нижний возрастной предел ДС опускают до позднего силура. Местами в разрезах ДС и КС присутствуют субвулканические тела основного, среднего и кисло-

го составов. Их внедрение происходило как во время накопления вулканогенных пород, так и после их окончательного формирования. Возрастное единство с эффузивами устанавливается на основании сходства составов и фактов перехода некоторых субвулканических тел в лавовые потоки. Среднепалеозойский возраст субвулканических пород устанавливается на основании перекрытия их фаунистически охарактеризованными образованиями эльмезтюбинской свиты [Письменный и др., 2004].

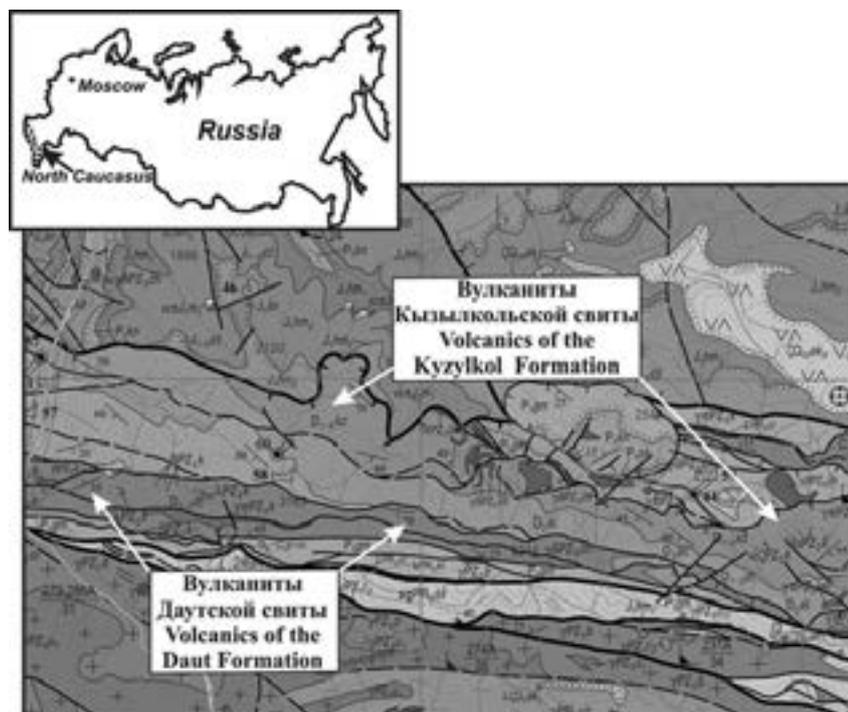


Рис. 1. Геологическая карта междуречья Кубани и Малки, на которой отмечены отложения Кызылкольской и Даутской свит (с использованием материалов ФГУГП «Кавказгеолсъемка», листы К-38-І, VII. 2004 г.) /

Fig. 1. Geological map of the interfluvium of Kuban and Malka, which shows the deposits of the Kyzylkol and Dautskaya suites (using materials of the FGUGP "Kavkazgeolsemka", sheets K-38-I, VII. 2004)

Материал и методы его исследования

Изучена коллекция образцов, отобранная в 2017–2020 гг. при посещении разрезов ДС и КС по долинам рек Большая Лаба, Уруп, Маруха, Даут, Кубань, Малка, Кызылол, Шаукол. Аналитические данные получены в ЦКП «ИГЕМ–Аналитика» – рентгено-флюоресцентный анализ (XRF), спектрометр «Респект-100» (47 проб) и спектроскопия с индукционно-связанной плазмой (ICP-MS), масс-спектрометр X-Series II (40 проб). Контроль точности анализов осуществлялся российскими и международными стандартами. Силикатные анализы использованы по литературным данным [Скрипченко, 1966; Лупанова, 1975].

Полученные результаты. Согласно классификационной диаграмме $(Na_2O+K_2O)-SiO_2$ (рис. 2), фигуративные точки (ФТ) составов пород КС свиты приурочены к полям нормально и низко щелочных пород – от базальтов до риолитов (БАДР). ФТ составов пород ДС расположены в полях нормально, умеренно и реже

низко-щелочных пород, с преобладанием базальтов, андезибазальтов и риолитов. **Na-базальты** ($SiO_2=52,1\%$, $Al_2O_3=15,1\%$, $Na_2O=4,5\%$, $K_2O=0,1\%$), **K-Na базальты** ($SiO_2=48,9\%$, $Al_2O_3=17,6\%$, $Na_2O=3,2\%$, $K_2O=1,7\%$) и **андезибазальты** образуют единую группу пород основного состава. Наименее измененные их разности отмечаются в разрезах КС и представлены лавами с разнообразными порфировыми до афировой структурами, во вкрапленниках отмечаются авгит и андезин-лабрадор с характерной ситовидной структурой. Основная масса апоинтерсертальная, апогиалопилитовая, грануло-офитовая и др. Порода состоит из плагиоклаза (олигоклаз-альбит) клинопироксена, хлорита, эпидота, с примесью сфена и рудного минерала. Текстура миндалекаменная. Миндалины выполнены хлоритом, карбонатом, халцедоном. Иногда в разрезе встречаются существенно авгитовые, базальтовые вариолиты состоящие на 50–60% из авгита и интерстиционного полевого шпата. В разрезах ДС породы основного состава представлены «зеленокаменными метабазальтами» в которых основными минералами являются олигоклаз – альбит, хлорит, эпидот, актинолит, карбонат, сфен, магнетит. **Андезидациты и дациты**. Микроструктура пород порфировая и афировая. Вкрапленники представлены плагиоклазом (олигоклаз, олигоклаз–андезин). Основная масса микропйкелитовая и апогиалопилитовая. Состоит из олигоклаза с примесью хлорита, карбоната кварца, рудного минерала, сфена и иногда калиевого полевого шпата. **Риолиты**. Микроструктура пород порфировая. Вкрапленники представлены преобладающим кварцем, олигоклазом и редко мусковитом. Основная масса аллотриоморфная, фельзитовая и микропйкелитовая и состоит из олигоклаза, кварца, калиевого полевого шпата, серицита иногда хлорита. Часто отмечаются микропрожилки выполненные кварцем, карбонатом, серицитом.

На АФМ диаграмме $(Na_2O+K_2O)-FeO-MgO$ (рис. 2) ФТ пород КС группируются ниже разделительной линии Т. Ирвайна и В. Барагара, т.е. приурочены к полю пород известково-щелочной серии, эволюционирующих по «боуэновскому» типу дифференциации, с накоплением кремнезема и щелочей в остаточном расплаве. Поведение ФТ пород ДС не столь однозначно. Можно отметить, что кислые породы ДС характеризуются резким накоплением щелочей, в то время как в основных породах иногда повышается FeO/MgO отношение. На диаграмме $FeO/MgO-SiO_2$ ФТ базальтов и андезибазальтов ДС локализованы в поле пород толеитовой серии для которой характерна дифференциация «феннеровского» типа с преимущественным накоплением железа, титана и протекающая при низком флюидном и парциальном давлениях кислорода [Миронов и др., 1999; Irvine, Baragar, 1971]. На диаграммах SiO_2 – петрогенные элементы установлена отрицательная корреляция SiO_2 с TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , MnO и CaO . При одних и тех же значениях SiO_2 , содержания CaO , MgO и Sr (в базальтах), Na_2O (во всех разновидностях) сильно варьируют. Породы КС и ДС – это, в основном, умеренно–титанистые, умеренно–магнезиальные ($Mg^\# = 0,4-0,6$) образования, среди которых преобладают умеренно–глиноземистые ($Al^I = 0,87$), низко-калиевые, с натровым типом щелочности ($Na_2O/K_2O=6,6-17,7$); U/Th отношение ($0,64 < 1$) свидетельствует о том, что их составы не изменены наложенными процессами. Встречаются также умеренно-калиевые, высоко-глиноземистые ($Al^I=1,65$), с K-Na типом щелочности ($Na_2O/K_2O=1,6-3,8$) породы, $U/Th=0,2-0,5$. Риолиты и дациты являются высоко-глиноземистыми ($Al^I=0,95-3,7$, $\Sigma/n 1,8$), с K-Na и Na типами щелочности ($Na_2O/K_2O=1,5-121$), $U/Th=0,04$; $Mg^\#=0,2-0,7$. (рис. 2, табл. 1; 2).

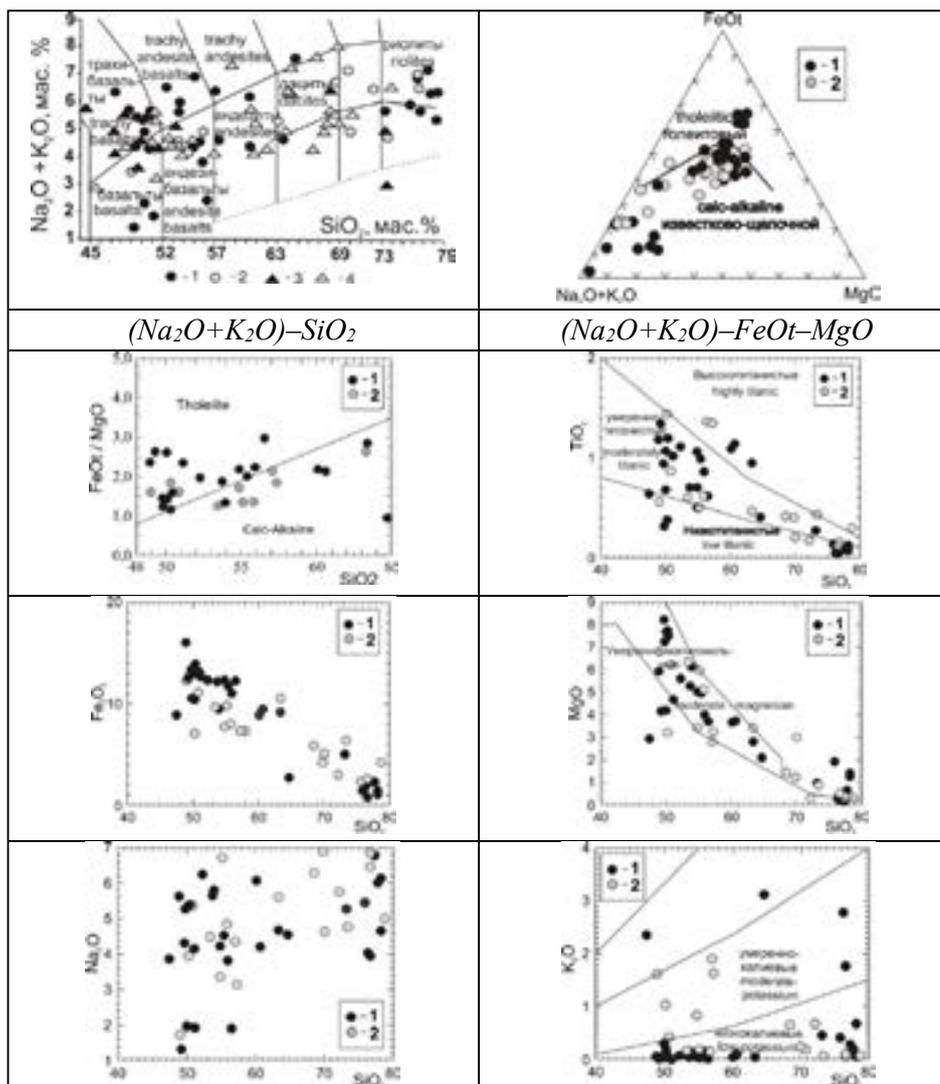


Рис. 2. Составы пород на классификационных диаграммах и диаграммах концентраций петрогенных компонентов (в мас. %). Условные обозначения: (1, 3) – вулканиды Даутской свиты; (2, 4) – вулканиды Кызылкольской свиты. (1, 2) – РФА ЦКБ «ИГЕМ-Аналитика»; (3, 4) силикатный анализ [Скрипченко, 1966; Лупанова, 1975] /

Fig. 2. Rock compositions on classification diagrams and diagrams of concentrations of petrogenic components (in wt %). Symbols: (1, 3) – volcanic rocks of the Dautskaya suite; (2, 4) – volcanic rocks of the Kyzylkol suite. (1, 2) – XRF of the Central Design Bureau “IGEM-Analytics”; (3, 4) silicate analysis [Skripchenko, 1966; Lupanova, 1975]

Таблица 1 / Table 1

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

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	50,05	49,74	53,91	50,08	48,92	54,88	53,44	55,84	52,29	50,31	47,42
TiO ₂	0,68	0,94	0,7	1,07	1,18	1,06	0,6	0,62	1,11	1,44	0,64
Al ₂ O ₃	15,18	16,53	15,44	15,47	15,25	14,35	15	15,61	15,71	19,11	17,25
Fe ₂ O ₃	13,11	13,34	9,47	12,96	16,02	12,33	9,7	8,07	12,34	7,1	8,86
MnO	0,17	0,24	0,14	0,26	0,20	0,16	0,16	0,16	0,31	0,17	0,18
MgO	4,2	8,22	6,14	7,67	5,93	5,04	6,36	5,13	5,6	3,24	2,93

CaO	8,25	1,23	5,8	2,91	2,88	2,92	6,67	6,11	3,6	7,58	8,79
Na ₂ O	1,98	4,31	5,8	5,32	5,62	4,22	4,48	4,86	6,24	3,95	3,87
K ₂ O	0,3	0,04	0,14	0,03	0,06	0,04	0,18	0,05	0,07	1,03	2,35
P ₂ O ₅	0,05	0,19	0,01	0,09	0,17	0,14	0,08	0,08	0,12	0,21	0,42
ППП	5,89	5,11	2,23	4,01	3,65	4,72	3,17	3,34	2,49	5,64	6,90
Сумма / Sum	99,86	99,89	99,78	99,87	99,88	99,86	99,84	99,87	99,88	99,78	99,61
Cr	16	9	197	61	17	18	153	175	15	62	23
V	402	284	261	343	319	339	191	194	246	172	225
Co	42	55	30	43	46	41	37	29	39	31	27
Ni	12	19	47	31	13	13	42	37	5	32	10
Cu	74	18	96	61	28	97	71	139	36	40	76
Zn	114	185	63	154	106	137	95	100	147	80	73
Pb	11	9	7	8	8	8	14	8	9	13	10
Rb	8	9	7	9	10	9	8	6	7	28	54
Sr	213	37	216	85	47	55	291	126	101	383	756
Ba	71	31	89	40	54	45	132	96	65	384	1225
Zr	24	87	52	73	91	102	35	41	54	225	78
Y	19	38	19	32	38	45	17	16	31	38	21
Li	12,9	12,4	3,6	17,4	6,2	7,9	28,1	19,1	11,4	103	12,3
Be	0,31	0,35	0,31	0,33	0,47	0,33	0,24	0,24	0,3	1,84	1,74
Sc	74,9	16,97	40,11	40,05	31,94	34,94	36,91	36,85	46,7	31	22,57
Ti	5695	5522	3988	6287	6888	6236	3228	3324	7280	10845	3604
Nb	0,29	0,79	3,75	1,02	0,98	0,96	0,44	0,46	0,5	8,9	4,85
Mo	0,23	0,44	3,16	1,09	0,78	0,32	0,43	0,48	1,3	0,84	0,47
Cd	0,11	0,04	0,08	0,07	0,07	0,08	0,08	0,16	0,2	0,24	0,1
Cs	0,161	0,15	0,2	0,18	0,12	0,18	0,17	0,19	0,1	3,1	0,2
La	1,56	0,81	2,6	2,5	2,2	3,77	2,69	2,56	2,2	18,6	25,4
Ce	3,60	1,95	6,73	7,04	6,18	10,23	6,29	6,31	6,3	42	52,07
Pr	0,67	0,34	0,98	1,1	0,95	1,64	0,87	0,85	1	4,9	6,12
Nd	3,43	1,90	5,07	5,92	5,09	8,82	4,29	4,11	5,8	23	25,49
Sm	1,26	1,32	1,66	2,13	1,91	3,0	1,3	1,35	2	5,3	4,8
Eu	0,64	0,4	0,59	0,81	0,6	0,92	0,51	0,47	0,9	1,67	1,33
Gd	1,82	1,84	1,99	2,8	2,31	3,75	1,57	1,48	2,4	5,9	3,88
Tb	0,41	0,34	0,39	0,51	0,44	0,72	0,27	0,25	0,5	0,94	0,48
Dy	2,55	2,01	2,46	3,26	2,81	4,81	1,7	1,45	3,4	5,7	2,25
Ho	0,61	0,43	0,53	0,69	0,59	1,06	0,38	0,30	0,7	1,16	0,43
Er	1,86	1,12	1,5	1,94	1,63	3,03	1,02	0,82	2,2	3,5	1,16
Tm	0,29	0,15	0,23	0,28	0,23	0,44	0,16	0,11	0,3	0,47	0,16
Yb	1,83	0,88	1,36	1,62	1,5	2,83	1,0	0,68	2,2	3,1	1,03
Lu	0,31	0,11	0,21	0,22	0,21	0,4	0,15	0,1	0,3	0,45	0,15
Hf	0,29	1,27	1,29	0,88	1,54	1,34	0,87	0,87	1	5,0	2,14
Ta	0,07	0,59	4,0	1,64	0,81	0,47	0,21	0,2	0,2	0,53	0,92
W	0,67	0,43	1,56	0,75	0,58	0,5	0,13	0,12	0,8	0,49	1,49
Bi	0,04	0,01	0,2	0,05	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,04	0,05
Th	0,26	0,18	0,35	0,16	0,21	0,38	0,39	0,37	0,2	5,0	6,57
U	0,29	0,11	0,16	0,08	0,19	0,17	0,20	0,31	0,1	1,05	3,63

Примечание/Note: 1 – базальты (*basalts*); 2, 3, 4, 5 – трахибазальты (*trachybasalts*); 6, 7, 8 – андезибазальты (*andesibasalts*); 9 – трахиандезибазальты (*trachyandesibasalts*); 10, 11 – К-Na базальты (*K-Na basalts*). 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 11 – Даутская свита (*Daut suite*); 7, 8, 10 – Кызылкольская свита (*Kuzylkol suite*).

Таблица 2 / Table 2

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

Sample	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
SiO ₂	57,06	57,35	60,09	60,65	63,3	63,39	64,71	68,5	73,14	73,46	75,86
TiO ₂	1,36	1,35	1,09	1,14	0,47	0,95	0,41	0,42	0,27	0,43	0,14
Al ₂ O ₃	15,7	16,09	15,28	14,23	13,31	13,72	15,68	14,11	12,08	10,91	12,55
Fe ₂ O ₃	7,35	7,35	8,92	9,45	10,55	9,21	2,73	5,92	5,04	6,36	1,43
MnO	0,15	0,12	0,16	0,07	0,13	0,10	0,04	0,12	0,1	0,23	0,02
MgO	2,8	3,25	3,67	3,75	3,42	2,8	2,1	1,47	0,97	0,89	1,93
CaO	5,57	6,46	1,96	3,21	0,51	2,6	2,36	0,67	0,7	1,29	0,22
Na ₂ O	4,35	3,15	6,08	4,21	5,6	4,68	4,55	6,29	5,28	4,77	5,45
K ₂ O	1,89	1,63	0,05	0,11	0,07	0,04	3,11	0,53	0,46	0,08	0,42
P ₂ O ₅	0,01	0,23	0,12	0,27	0,06	0,21	0,23	0,1	0,07	0,18	0,05
ППП	3,31	2,75	2,50	2,83	2,47	2,20	3,78	1,78	1,81	1,33	1,89
Сумма / Sum	99,55	99,73	99,92	99,92	99,89	99,90	99,70	99,91	99,92	99,93	99,96
Cr	24	41	8	11	18	15	76	14	22	16	24
V	151	146	160	126	371	240	74	50	17	24	8
Co	21	22	30	32	21	22	11	10	9	9	8
Ni	20	20	8	8	9	10	35	9	9	10	8
Cu	34	49	11	11	40	12	8	11	14	37	8
Zn	81	87	102	36	136	58	51	99	113	152	21
Pb	46	23	8	8	9	8	13	14	9	9	7
Rb	53	44	8	10	6	8	97	15	11	6	11
Sr	260	304	58	96	95	97	245	70	36	155	57
Ba	500	663	18	40	61	48	1150	143	121	73	101
Zr	265	251	78	146	24	105	173	101	72	34	53
Y	37	37	33	53	8	34	10	32	29	18	11
Li	48	50	5,2	8	25	5,4	31,96	15	11	23	0,45
Be	2,6	2,2	0,3	0,38	0,09	0,33	2,51	0,67	0,4	0,26	0,32
Sc	25	25	28,22	22,78	50	25,2	6,17	22	24,6	32	8,79
Ti	9494	9066	6200	6552	3035	5437	2438	2539	1541	2086	878
Nb	10,8	11,2	0,71	1,61	0,24	1,01	4,12	1,48	0,6	0,36	0,38
Mo	0,93	1,24	0,31	0,38	0,63	0,43	0,1	0,35	1,9	0,96	4,21
Cd	0,1	0,08	0,02	0,05	0,01	0,06	0,3	0,021	0,2	0,02	0,06
Cs	2,11	0,44	0,95	4,11	0,05	0,34	1,04	0,54	0,2	0,05	0,15
La	1,22	0,73	0,11	0,18	0,53	0,14	1,34	1,79	0,6	0,2	0,24
Ce	1,25	1,28	0,19	0,19	0,15	0,19	6,2	0,55	0,5	0,06	0,34
Pr	25	25	1,84	5,58	0,6	3,60	29,43	4,3	1	0,8	0,68
Nd	56	54	4,94	15,67	1,38	9,06	58,42	11,2	2,9	2,3	2,34
Sm	6,8	6,7	0,76	2,49	0,22	1,46	7,12	1,5	0,4	0,39	0,29
Eu	28	27	4,35	13,49	1,2	7,54	23,43	7,4	2,3	2,1	1,39
Gd	6,3	6	1,73	4,33	0,47	2,50	3,8	2,3	0,8	0,84	0,52
Tb	1,69	1,71	0,64	1,39	0,21	0,68	1,01	0,65	0,2	0,42	0,19
Dy	6,7	6,6	2,36	5,14	0,71	3,10	2,32	3	0,9	1,41	0,8
Ho	1,06	1,03	0,43	0,90	0,14	0,54	0,31	0,53	0,2	0,26	0,18
Er	6,3	6	2,78	5,62	1,06	3,51	1,42	3,7	1,5	1,91	1,16
Tm	1,26	1,19	0,59	1,17	0,23	0,77	0,29	0,79	0,4	0,44	0,31
Yb	3,7	3,4	1,65	3,17	0,71	2,24	0,68	2,5	1,2	1,38	0,86
Lu	0,52	0,48	0,22	0,43	0,1	0,29	0,11	0,38	0,2	0,21	0,15
Hf	3,4	3,1	1,36	2,67	0,74	1,88	0,63	2,5	1,5	1,46	0,96
Ta	0,49	0,45	0,18	0,35	0,11	0,25	0,11	0,38	0,2	0,23	0,17
W	6	5,6	1,31	2,22	0,3	1,30	4,1	2	1,7	0,53	0,96
Bi	0,74	0,77	0,43	0,50	0,03	0,47	0,31	0,1	0,01	0,02	0,04
Th	0,87	0,61	0,78	1,15	0,41	0,52	1	1,05	0,7	0,14	1,01
U	0,05	0,05	0,01	0,03	0,01	0,05	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01

Примечание / Note: 12, 13, 14, 15 – андезиты (andesites); 16, 17, 18, 19 – дациты (dacites); 20, 21, 22 – рюлиты (rhyolites). 14, 15, 17, 18, 20, 22 – Даутская свита (Daut suite); 12, 13, 16, 19, 21 – Кызылькольская свита (Kyzylkol suite).

ФТ пород основного состава КС и ДС на дискриминационной диаграмме (ДД) для базальтов $Y/15-La/10-Nb/8$ [Cabanis, Lecolle, 1989] расположены в поле остро-водужных толеитов. На ДД $Nb \times 2 - Zr/4 - Y$ [Meschede, 1986] ФТ расположены преимущественно в поле базальтов океанических дуг *N-MORB* типа и в единичных случаях базальтов *E-MORB* типа. На ДД TiO_2-K_2O [Миронов и др., 1999] ФТ приурочены к полям базальтов срединно-океанических хребтов, задуговых зон спрединга и частично островных дуг. На ДД $Ce/Nb-Th/Nb$ по [Saundres et al., 1988] выделены геодинамические обстановки (ГО) и компоненты вносящие вклад в образование базальтов. Здесь ФТ расположены преимущественно в поле базальтов задуговых бассейнов со смещением к точке (*SDC*) – обогащение субдукционной компонентой. На ДД $Sm/Yb-La/Sm$ [Школьник, Резницкий и др., 2009] ФТ тяготеют к тренду плавления шпинелевых перидотитов. Степень плавления субстрата в большинстве случаев достигала 8–15%, но местами была ниже – 0,5–2,0%. ФТ пород среднего и кислого составов на ДД $Rb/30-Hf-Ta \times 3$ [Harris et al., 1986] группируются в поле гранитов вулканических дуг (*VAG*). Риолиты по многим параметрам сопоставимы ($SiO_2=72,7$; $TiO_2=0,3$; $Al_2O_3=12,4\%$; $Na_2O=5,4\%$; $K_2O=0,4\%$) с гранитами толеитового ряда по геохимической классификации Л.В. Таусона. Сопоставление петрохимических показателей кислых вулканитов с геохимическими типами гранитов по систематике [White, Charpell, 1983] показывает, что они близки с гранитами *M-type* ($Rb=24$ г/т; $Nb=2,1$ г/т; $Zr=118$ г/т; $Ba=209$ г/т; $Rb/Sr=0,1$ г/т). Некоторые отличия заключаются в меньших содержаниях $CaO=2,3\%$. Отметим, что вулканиты с подобными характеристиками обычно рассматриваются как продукты плавления мантийных источников и как дифференциаты основных толеитовых расплавов [Туркина, 2014]. Спектры редких земель (*REE*), *Na*, *KONa* базальтов, кислых вулканитов, нормированные к хондриту [San, McDonough, 1989] (рис. 4), заметно различаются. *Na*-базальты имеют линии спектров *REE*, близкие с трендом *N-MORB* с небольшими отличиями в области *LREE*. La_n/Yb_n отношение (как показатель степени фракционирования *REE*) = 0,6–1,3; $La_n/Sm_n=0,7-1,2$; $Gd_n/Yb_n=0,8-1,7$. Отношение Eu/Eu^* (где $Eu^*=(Sm_n+Gd_n)/2$) варьирует в пределах 0,8–1,2. Отношение $Eu/Eu^* < 0,95$ свидетельствует об обеднении, а $Eu/Eu^* > 1,05$ – об обогащении *Eu*. $\sum REE$ г/т 60–235; $\sum/n=145$ ($n=15$). *K-Na* базальты характеризуются более крутыми линиями спектров *REE* и расположены между трендами базальтов *E-MORB* и *OIB*. $La_n/Yb_n=4,2-17,7$; $La_n/Sm_n=2,3-3,4$; $Gd_n/Yb_n=1,6-3,1$; $Eu/Eu^*=0,8-0,9$; $\sum REE=440-568$ г/т; \sum/n 496 ($n=3$). Среди вулканитов кислого состава выделяются две группы, незначительно различающиеся по концентрациям *LREE*; $\sum REE$ и Eu/Eu^* (рис. 4). Можно отметить, что в целом их спектры *REE* сопоставимы с *Na*-базальтами. Первая группа имеет $La_n/Yb_n=0,5-1,9$; $La_n/Sm_n=0,7-1,2$; $Gd_n/Yb_n=0,8-1,3$; $Eu/Eu^*=0,6-0,76$; $\sum REE$ (в г/т)=193–410; $\sum/n=301$ ($n=4$). Распределение *REE* здесь сопоставимо с трендом гранитов *M-type*. Вторая группа – $La_n/Yb_n=0,2-0,5$; $La_n/Sm_n=0,6-0,8$; $Gd_n/Yb_n=0,3-0,8$; $Eu/Eu^*=0,7-1,2$; $\sum REE$ (в г/т)=49–98; $\sum/n=77$ ($n=5$). Более детально девонские вулканиты кислого состава будут рассмотрены нами при описании диорит–порфирового, гипабиссального Бахмуткинского D_{2-3} комплекса [Семенуца и др., 2009]. На мультиэлементных диаграммах концентрации несовместимых элементов нормированы по *N-MORB* [San, McDonough, 1989]. Спектры *Na*-базальтов (рис. 4) сопоставимы с базальтами *N-MORB*. Небольшие отличия заключаются в наличии отрицательных аномалий *K* и *Nb*, положительной аномалии *Ta*, в более высоких концентрациях крупно ионных элементов *Ba*, *Th*, *U* и разноплановом поведении *Sr*; и негативных аномалиях *Hf* и *Y*. Спектры *K-Na* базальтов расположены ближе к тренду *E-MORB*

при существенных вариациях содержаний от *N-MORB* до *OIB*. Отмечаются негативные аномалии *Nb*, *Ta* и высокие содержания гидромагматофильных элементов *Rb*, *Ba*, *U*, *K*, *Sr*. Отметим, что *Ba*, *U*, *Sr* являются индикаторами флюидного субдукционного компонента. Высокие содержания *Th*, немобильного в водном флюиде, может свидетельствовать об участии осадочного компонента в магмогенезисе [Мартынов, 2010]. Кларковые концентрации ($Kk \geq 1,0$) *Na*-базальтов $Sb_{2,4}$, $Pb_{1,4}$, $Zn_{1,4}$, $Sc_{1,3}$, $Co_{1,3}$, $Cu_{1,3}$, $V_{1,0}$; андезитов $Sb_{2,3}$, $Cs_{2,2}$, $Sc_{1,7}$, $V_{1,1}$, $Cr_{1,0}$, $Co_{1,0}$ ($Zn_{0,8}Pb_{0,6}$) и риолитов $Sb_{2,2}$, $Sc_{2,0}$, $Co_{1,0}$, $Zn_{1,0}$ ($Cu_{0,6}$, $Pb_{0,6}$), в сравнении с эталонными для пород разных геодинамических обстановок [Гусев и др., 1999], показывает, что они согласуются с породами юных и развитых островных дуг. *K-Na* базальты с $Cs_{2,6}$, $Sb_{2,0}$, $Pb_{1,6}$, $Ba_{1,4}$, $Co_{1,1}$, $Sc_{1,1}$, $Sr_{1,1}$, $Ce_{1,1}$, $Pr_{1,1}$, $Nd_{1,1}$, $Tm_{1,1}$ ($Zn_{0,9}$, $Cu_{0,8}$) имеют неоднозначные (смешанные) характеристики.

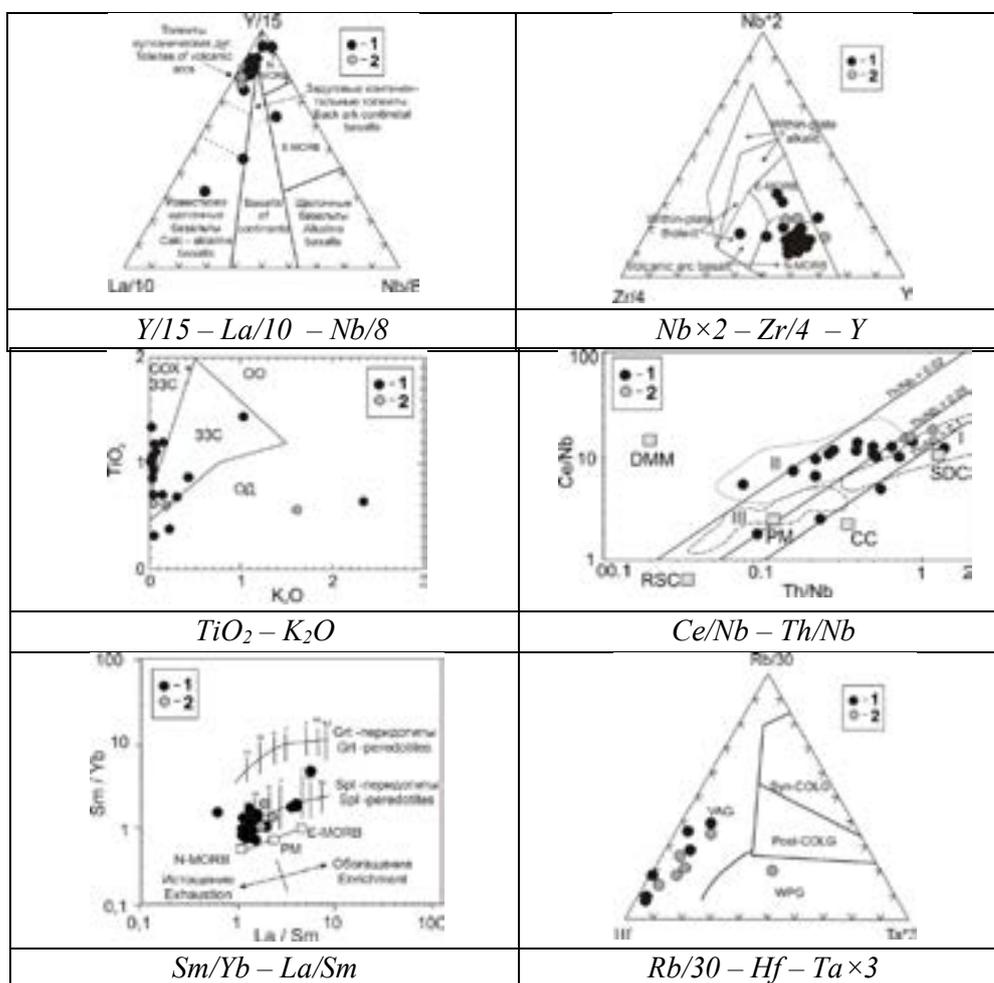


Рис. 3. Составы пород на дискриминационных и петрогенетических диаграммах. На диаграммах: TiO_2-K_2O поля составов базальтов COX – срединно-океанических хребтов, OO – океанических островов, ЗЗС – задуговых зон спрединга, ОД – островных дуг. $Ce/Nb-Th/Nb$ поля составов базальтов I – островных дуг, II – задуговых бассейнов, III вулканических плато и компоненты дающие вклад в образование базальтов DMM – деплетированная мантия, RSC – рециклированный компонент, PM – примитивная мантия, SDC – субдукционный компонент, CC – континентальная кора. На диаграмме $Rb/30-Hf-Ta \times 3$: VAG – граниты вулканических дуг; sup-COLG – граниты синколлизийные; post-COLG – граниты постколлизийные; WPG – граниты внутриплитные /

Fig. 3. Rock compositions on discrimination and petrogenetic diagrams

On the diagrams: TiO₂-K₂O composition fields of MOR basalts – mid-ocean ridges, OO – oceanic islands, ZZS – back-arc spreading zones, OD – island arcs. Ce/Nb-Th/Nb compositional fields of basalts I – island arcs, II – back-arc basins, III volcanic plateaus and components contributing to the formation of basalts DMM – depleted mantle, RSC – recycled component, PM – primitive mantle, SDC – subduction component, CC – continental crust. Rb/30-Hf-Ta×3 diagram: VAG – granites of volcanic arcs; syn-COLG – syncollision granites; post-COLG – post-collision granites; WPG – within plate granites

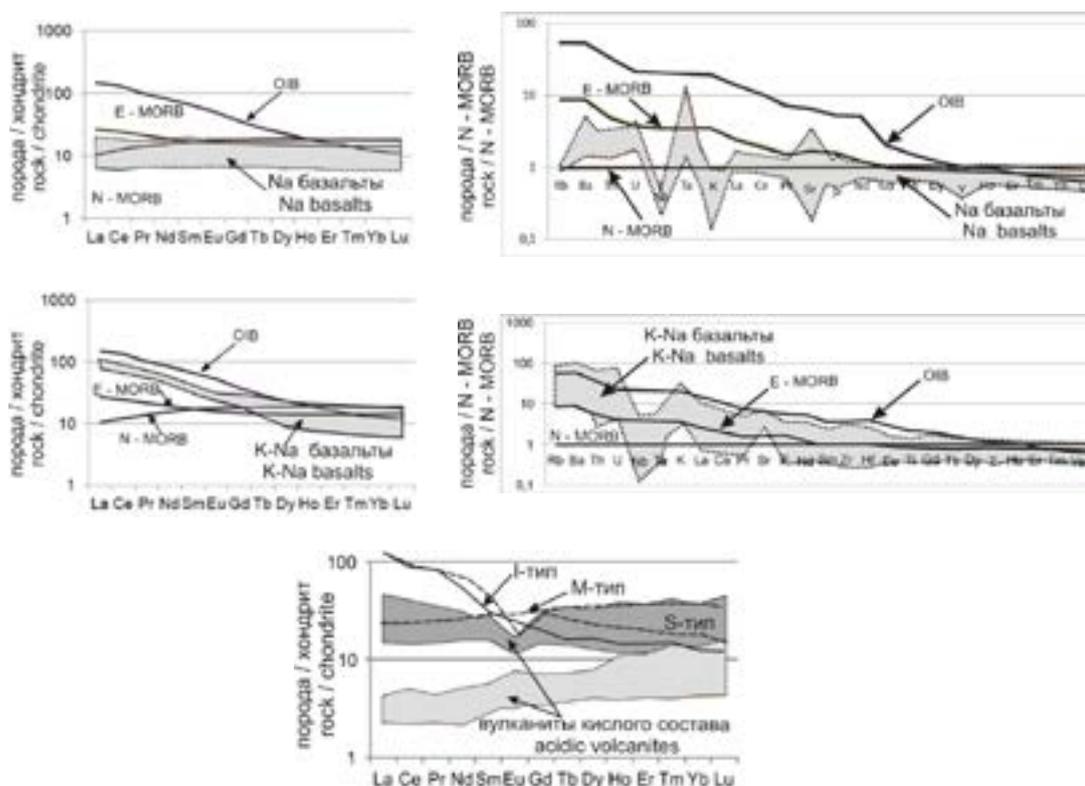


Рис. 4. Спайдер-диаграммы составов пород. Концентраций несовместимых элементов нормированы по N – MORB, концентрации REE нормированы к хондриту по [San, McDonough, 1989] /

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]

Результаты работы и их обсуждение

В силурийско-раннеэйфельское время в направлении с юга на север в Кавказском регионе существовали следующие геотектонические мегаструктуры: Понтийско-Закавказский (Дзирульский) массив Закавказской литосферной плиты; океаническая впадина Палеотетиса в центре которой располагался Срединно-океанический хребет (СОХ); островодужная система; морской бассейн покрывающий Скифско-Туранскую плиту (СТП). В СОХ, происходили явления спрединга и формировалась нижнедевонская океаническая кора (ОК). Одновременно на северной окраине Палеотетиса шел компенсационный процесс с субдукцией ОК. В результате здесь формировались две субпараллельные островные дуги (ОД): Ки-

зилкольская, ближе к СТП и Лабино-Зарауская (Урупская), внешняя. В Кизилкольской дуге происходило накопление вулканитов базальт–андезит–риолитовой, а в Лабино-Зарауской – базальт–риолитовой ассоциации [Омельченко, 2010]. Исходя из выше изложенного, отметим, что рассмотренные вулканиты, по-видимому, приурочены к фрагментарной аккреционной структуре сформированной в позднем девоне при столкновении Урупской и Кизилкольской ОД, а возможно и более древних ордовик–силурийских, с геохимическими признаками юных ОД [Газеев, Гурбанов, 2020]. Изученные породы основного состава – это умеренно титанистые и умеренно магнезиальные образования. В КС они соответствуют породам известково-щелочной, а в ДС – толеитовой сериям. Среди них выделены две разновидности – *Na* и *K-Na* базальтоиды. Первые – умеренно глиноземистые с *Na* типом щелочности, близкие к базальтам *N-MORB* типа. Вторые – более высокоглиноземистые с *K-Na* типом щелочности, близкие к базальтам *E-MORB* типа. На диаграммах их ФТ группируются в полях островодужных толеитов и базальтов океанических дуг либо СОХ и задуговых зон спрединга. По геохимическим критериям они сопоставимы с породами юных и развитых ОД. По представлениям [Рябов и др., 1992] здесь имел место процесс внутридугового рифтинга, в результате которого, по-видимому, формировалась ДС ($TiO_2=0,7-1,4$). Мы предполагаем, что наблюдаемые различия базальтов связаны с разной степенью плавления исходных «шпинелевых» перидотитов от 0,5–2,0% до 8,0–15% и разной степенью их зараженности субдукционной компонентой. Вулканиты кислого состава по петрохимическим показателям близки с гранитами толеитового ряда и гранитами *M-type*. Их тесная ассоциация с базальтами свидетельствует о том, что они являются дифференциатами основных толеитовых расплавов, а не самостоятельными продуктами плавления мантийных источников. Отметим, что с гранитами *M-type* иногда ассоциируют медно–порфировые и медно-золоторудные месторождения. [Еременко и др., 2021]. Девонские колчеданные месторождения СК несут в себе промышленное оруденение *Cu, Zn, Au, Ag, платина, палладий* [Богуш и др., 2020] и других металлов. По структурно–генетическим признакам здесь выделяются два основных типа руд – «урупский» (*Cu-Zn*) и «худесский» (*Cu-Co*). Для месторождений «урупского» типа, ассоциирующих с вулканитами ДС, характерно переслаивание сплошных колчеданных руд с образованиями хемогенно-осадочного типа (кремнисто-гематитовыми сланцами). Генетическая модель этих месторождений несет в себе главнейшие черты оруденения впадинного гидротермально-рассольного класса и частично аналогична модели типа «Атлантис II» Красноморского рифта. Месторождения «худесского» типа формировались в обстановке гидротермального процесса высокой интенсивности. Генетическая модель месторождений этого типа может включать в себя механизм образования щитовидных сульфидных залежей на дне океана [Рябов и др., 1992]. Известно, что геодинамические обстановки колчеданообразования чрезвычайно разнообразны и магматизм играет существенную роль при формировании колчеданных руд. Приповерхностные магматические очаги являются источниками энергии для возникновения и функционирования конвективных гидротермальных систем, а в случае их заполнения водонасыщенными расплавами, одновременно и поставщиками металллоносных магматогенных флюидов. Магматизм может быть при этом

как дифференцированным (в большинстве островодужных обстановок), так и примитивным толеитовым. Вмещающие вулканогенные и осадочные породы служат основным источником рудных компонентов экстрагируемых и транспортируемых к месту рудоотложения гидротермальными растворами в рециклинговых системах, а колчеданное оруденение во многом наследует геохимические особенности толщ, «промываемых» гидротермальными растворами. Существенное значение имеет также и скорость спрединга. Более спокойный вулканотектонический режим способствует длительному проявлению высокотемпературной гидротермальной активности [Миронов и др., 1999; Краснов, 1992]. По-видимому, этим и следует объяснять отмечаемые различия месторождений «урупского» и «худесского» типа.

Выводы

Изучены петролого-химические и геохимические особенности ранне–среднедевонских вулканогенных пород из районов колчеданных месторождений Передового хребта БК, приуроченных к аккреционной структуре, сформированной в позднем девоне при столкновении Урупской и Кизылкольской островодужных систем. Показано, что среди вулканитов основного состава присутствуют две разновидности – *Na* и *K-Na* базальтоиды. Первые – умеренно глиноземистые с *Na* типом щелочности, близкие к базальтам *N-MORB* типа, $La_n/Yb_n=0,6–1,3$. По геохимическим критериям они сопоставимы с породами юных и развитых ОД. Вторые – высокоглиноземистые с *K-Na* типом щелочности, близкие к базальтам *E-MORB* типа, $La_n/Yb_n=4,2–17,7$. Предполагается, что наблюдаемые различия базальтов связаны с разной степенью плавления исходных «шпинелевых» перидотитов и разной степенью их зараженности субдукционной компонентой. Вулканиты кислого состава по петрохимическим показателям близки с гранитами толеитового ряда и гранитами *M* типа. Их тесная ассоциация с базальтами свидетельствует о том, что они являются дифференциатами основных толеитовых расплавов. Предполагается, что в раннем–среднем девоне на северной окраине Палеотетиса в зоне БК имел место островодужный процесс, осложненный внутридуговым рифтингом, на что указывает расположение ФТ на диаграммах, группирующихся в полях от островодужных толеитов до базальтов СОХ и задуговых зон спрединга.

Литература

1. Ажгирей Г.А., Баранов Г.И., Кропачев С.М. и др. Геология Большого Кавказа. – М.: Недра. 1976. – 249 с.
2. Богущ И.А., Рябов Г.В., Черкашин В.И. Гензис 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.
3. Газеев В.М., Гурбанов А.Г. Раннепалеозойские габброиды архызского интрузивного комплекса (Северный Кавказ): геодинамическая типизация и минерагения. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №3. – С. 6–22. DOI: 10.46698/VNC.2020.83.87.001.
4. Гусев Г.С., Кудрявцев Ю.К., Гушин А.В., Сурин Т.Н., Бескин С.М., Донец А.И., Ермолаев А.Н., Жабин А.Г., Куриленко Н.М., Онтоева Т.Д., Ширай Е.П. Геохимическая и металлогеническая специализация структурно–вещественных комплексов. – СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. – 514 с.

5. Еременко А.В., Ненахов В.М., Жабин А.В. Геодинамическое картирование. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2021. – 99 с.
6. Краснов С.Г. Современное океаническое колчеданообразование. // Вулканогенно-осадочное рудообразование. – СПб., 1992. – С. 147–150.
7. Лупанова Н.П. Формации магматических пород нижнего и среднего палеозоя. – М.: Наука, 1975. – 178 с.
8. Мартынов Ю.А. Основы магматической геохимии. – Владивосток: Дальнаука, 2010. 215 с.
9. Миронов Ю.В., Емельянова Е.А., Зорина Ю.Г., Мирлин Е.Г. Вулканизм и океаническое колчеданообразование. – М.: Научный мир, 1999. – 147 с.
10. Омельченко В.Л. Офиолиты Северного Кавказа и некоторые проблемы геологии его древних комплексов. – Ессентуки, 2021. – 154 с.
11. Письменный А.Н., Пичужков А.Н., Зарубина М.А. Государственная геологическая карта РФ. К-38-I, VII. (Кисловодск). – СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. – 259 с.
12. Рябов Г.В., Скрипченко Н.С., Щеглов В.И. и др. Формационные типы колчеданных месторождений Северного Кавказа. // Вулканогенно-осадочное рудообразование. – СПб., 1992. – С. 91–93.
13. Семенуха И.Н., Черных В.И., Соколов М.Г., и др. Объяснительная записка, листы К-37-VI, К-37-XII (Карачаевск), серия кавказская, второе издание. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. – 204 с.
14. Скрипченко Н.С. Вулканогенно-осадочное рудообразование (на примере колчеданных месторождений Северного Кавказа). – М.: Недра, 1966. – 277 с.
15. Туркина О.М. Лекции по геохимии магматического и метаморфического процессов. – Новосибирск: РИЦ НГУ, 2014. – 118 с.
16. Школьник С.И., Резницкий Л.З. и др. Геохимия, вопросы петрогенезиса и геодинамическая типизация метавулканитов Тункинского террейна (Байкало-Хубсугульский регион). // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. №9. – С. 1013–1024.
17. Cabanis B., lecolle M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et lamise en evidence des processus de melange et/ou contamination crustale. // C. R. Acad. Sci. Ser. II. – 1989. – Vol. 309. – pp. 2023-2029.
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. Irvine T.N., Baragar W.R.A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. // Canad. J. Earth Sci. – 1971. – Vol.8. No.3. – pp. 523-547.
20. Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. // Chemical Geol. – 1986. – Vol. 56. – pp. 207-218.
21. Saundres A.D., Norry M.J., Tarney J. Origin of MORB and chemically- depleted mantle reservoirs trace element constraints. // J. Petrol. – 1988. – pp. 415-445.
22. Sun S.S., Mc Donough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts. // Geol. Spec. Publ. – 1989. – No.42. – pp. 313-345.
23. White A.J.R., Chappell B.W. Granitoid types and their distribution in the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. Circum-Pacific Terranes. // Geol. Soc. America, Memoir. – 1983. – Vol. 46. – pp. 21-34.

References

1. Azhgirey G.A., Baranov G.I., Kropachev S.M. et al. Geology of the Greater Caucasus. Moscow. Nedra. 1976. 249 p. (In Russ.)
2. Bogush I.A., Ryabov G.V., Cherkashin V.I. Genesis and ore-bearing structures of the Chuchkur deposit of noble metals in 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 (In Russ.)
3. Gazeev V.M., Gurbanov A.G. Early Paleozoic gabbroids of the Arkhyz intrusive complex (Northern Caucasus): geodynamic typification and minerageny. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2020. Vol. 10. No. 3. pp. 6–22. DOI: 10.46698/VNC.2020.83.87.001 (In Russ.)
4. Gusev G.S., Kudryavtsev Yu.K., Gushchin A.V. Geochemical and metallogenic specialization of structural-material complexes. Saint Petersburg. VSEGEI. 1999. 514 p. (In Russ.)
5. Eremenko A.V., Nenakhov V.M., Zhabin A.V. Geodynamic mapping. Voronezh. VSU. 2021. 99 p. (In Russ.)
6. Krasnov S.G. Modern oceanic pyrite formation. Volcanic-sedimentary ore formation. Saint Petersburg. 1992. pp. 147–150. (In Russ.)
7. Lupanova N.P. Formations of igneous rocks of the Lower and Middle Paleozoic. Moscow. Nauka, 1975. 178 p. (In Russ.)
8. Martynov Yu.A. Fundamentals of magmatic geochemistry. Vladivostok. Dalnauka. 2010. 215 p. (In Russ.)
9. Mironov Yu.V., Emelyanova E.A., Zorina Yu.G., Mirlin E.G. Volcanism and oceanic pyrite formation. Moscow. Nauchnyy mir. 1999. 147 p. (In Russ.)
10. Omelchenko V.L. Ophiolites of the North Caucasus and some problems of the geology of its ancient complexes. Essentuki. 2021. 154 p. (In Russ.)
11. Pismenny A.N., Pichuzhkov A.N., Zarubina M.A. State geological map of the Russian Federation. K-38-I, VII. (Kislovodsk). Saint Petersburg, VSEGEI. 2004. 259 p. (In Russ.)
12. Ryabov G.V., Skripchenko N.S., Shcheglov V.I. Formation types of pyrite deposits in the North Caucasus. Volcanic-sedimentary ore formation. Saint Petersburg. 1992. pp. 91–93. (In Russ.)
13. Semenukha I.N., Chernykh V.I., Sokolov M.G., et al. Explanatory note, sheets K-37-VI, K-37-XII (Karachaevsk), Caucasian series, second edition. Saint Petersburg, VSEGEI. 2009. 204 p. (In Russ.)
14. Skripchenko N.S. Volcanogenic-sedimentary ore formation (on the example of pyrite deposits of the North Caucasus). Moscow. Nedra, 1966. 277 p. (In Russ.)
15. Turkina O.M. Lectures on the geochemistry of magmatic and metamorphic processes. Novosibirsk, RIC NSU. 2014. 118 p. (In Russ.)
16. Shkol'nik S.I., Reznitskii L.Z., Belichenko V.G., Barash I.G. Geochemistry, petrogenesis, and geodynamic typification of metavolcanics of the Tunka terrane (Baikal-Hövsgöl Region). *Russian Geology and Geophysics*. 2009. Vol. 50. No. 9. pp. 779–788. DOI: 10.1016/j.rgg.2009.08.003. (In Russ.)
17. Cabanis B., lecolle M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et lamise en evidence des processus de mélange et/ou contamination crustale. *C. R. Acad. Sci. Ser. II*. 1989. Vol. 309. pp. 2023–2029.
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. Irvine T.N., Baragar W.R.A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canad. J. Earth Sci.* 1971. Vol. 8. No.3. pp. 523–547.

20. Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geol.* 1986. Vol. 56. pp. 207–218.

21. Saundres A.D., Norry M.J., Tarney J. Origin of MORB and chemically-depleted mantle reservoirs trace element constraints. *J. Petrol.* 1988. pp. 415–445.

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

23. White A.J.R., Chappell B.W. Granitoid types and their distribution in the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. *Circum-Pacific Terranes. Geol. Soc. America, Memoir.* 1983. Vol. 46. pp. 21–34.

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

УДК 551.21.032

DOI: [10.46698/VNC.2023.14.41.002](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.14.41.002)

Original paper

Eruption of the mud volcano “Lokbatan”

G.J. Yetirmishli , S.E. Kazimova Republican Seismic Survey Center Azerbaijan National Academy of Sciences,
123 Guseyn Javid Str., Baku AZ1001, Azerbaijan, e-mail: sabina.k@mail.ru

Received: 09.01.2023, revised: 14.02.2023, accepted: 20.02.2023

Abstract: Relevance. Mud volcanoes are the main mechanism that creates the process of migration of hydrocarbons in a three-dimensional geological environment. At the same time, eruptive channels of mud volcanoes and tensile cracks created by the process of formation of diapiric structures serve as migration channels. If we take into account that almost all oil fields located in the territory of mud volcanism development are complicated by eruptive channels of mud volcanoes associated with Maikop deposits, then the mechanism of filling reservoirs of the productive stratum due to vertical migration of hydrocarbons is proved very convincingly, which is relevant for our country. **The aim** of this article was to study the eruptions of the Lokbatan Mud Volcano – which is one of the most famous mud volcanoes in the world due to its frequent fiery eruptions. **Methods.** Due to the high resolution of digital seismic equipment manufactured by Kinometrics (USA) of the Republican Seismic Survey Center at ANAS (RSCC), records of mud volcano eruptions were recorded and analyzed. In addition, in 2022, within the framework of the international project “Expansion of the seismic network in the Caucasus and Central Asia”, 22 seismic stations manufactured by Nanometrics (Canada) were installed in Azerbaijan. For the first time in the world, in order to study the dynamics of mud volcanoes, 12 such stations were installed around the mud volcanoes Lokbatan and Otman-Bozdag. **Results.** Thus, it was found that the eruption of the Lokbatan volcano in 2012 during the day was characterized by 3 periods of activation. The first one occurred in the morning at 04:59:17.7 (eruption duration 7 minutes, focus depth 5 km, $E=0.64 \times 10^7$ J), the next ones at 09:14:40 (eruption duration 4 minutes, focus depth 5.5 km, $E=0.70 \times 10^7$ J) and at 09:23:00 (duration of eruption 12 minutes, focus depth 1.2 km, $E=3.15 \times 10^7$ J).

Keywords: Lokbatan mud volcano, Otman-Bozdag mud volcano, digital seismic stations.

For citation: Yetirmishli G.J., Kazimova S.E. Eruption of the mud volcano “Lokbatan”. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(1): 22-33. DOI: 10.46698/VNC.2023.14.41.002.

ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

DOI: [10.46698/VNC.2023.14.41.002](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.14.41.002)

Оригинальная статья

Извержение грязевого вулкана «Локбатан»

Г.Д. Етирмишли^{id}, С.Э. Казымова^{id}

Республиканский Центр Сейсмологической Службы, Национальная Академия Наук
Азербайджана, Республика Азербайджан, AZ1001, г. Баку, ул. Г. Джавида, 123,
e-mail: sabina.k@mail.ru

Статья поступила: 09.01.2023, доработана: 14.02.2023, принята к публикации: 20.02.2023

Резюме: Актуальность работы. Грязевые вулканы являются основным механизмом, создающим процесс миграции углеводородов в трехмерной геологической среде. При этом каналами миграции служат эруптивные каналы грязевых вулканов и трещины растяжения, созданные процессом формирования диапировых структур. Если принять во внимание, что практически все нефтяные месторождения, расположенные на территории развития грязевого вулканизма, осложнены эруптивными каналами грязевых вулканов, связанных с майкопскими отложениями, то механизм заполнения резервуаров продуктивной толщи за счет вертикальной миграции углеводородов доказывается весьма убедительно, что является актуальным для нашей страны. **Целью** данной статьи являлось изучение извержений грязевого вулкана Локбатан, являющегося одним из самых известных грязевых вулканов во всем мире из-за его частых огненных извержений. **Методы работы.** Благодаря высокой разрешающей способности цифровой сейсмической аппаратуры производства «Кинеметрикс» (США) Республиканского центра сейсмологической службы при НАНА (РЦСС) были зарегистрированы и проанализированы записи извержений грязевых вулканов. Кроме того, в 2022 г. в рамках международного проекта «Расширение сейсмической сети на Кавказе и в Центральной Азии» на территории Азербайджана были установлены 22 сейсмических станций производства Nanometrics (Канада). Впервые в мире с целью исследования динамики грязевых вулканов 12 таких станций были установлены вокруг грязевых вулканов «Локбатан» и «Отман-Боздаг». **Результаты работы.** Таким образом, было установлено, что извержение вулкана Локбатан 2012 г. в течение дня характеризовалось тремя периодами активизации. Первый произошел утром в 04:59:17.7 (длительность извержения 7 минут, глубина очага 5 км, $E=0,64 \times 10^7$ Дж), последующие в 09:14:40 (длительность извержения 4 минуты, глубина очага 5,5 км, $E=0,70 \times 10^7$ Дж) и в 09:23:00 (длительность извержения 12 минут, глубина очага 1,2 км, $E=3,15 \times 10^7$ Дж). 2 мая 2017 г. 08:55:51 произошло очередное сильное извержение вулкана Локбатан. Длительность извержения составила 4 минуты, глубина очага 4 км. Выделившаяся энергия составила $E=1,12 \times 10^7$ Дж. Последнее извержение данного вулкана произошло 11 августа 2022 г. Толщина излившегося покрова грязи составила 80–90 см. Извержение началось утром в 09:36:35. Глубина извержения составила 3 км, а выделившаяся энергия $0,6 \times 10^7$ Дж. Очаги развития грязевых вулканов располагаются преимущественно на глубинах 1–5 км, т.е. развитие грязевых вулканов связано с активными внутренними процессами, протекающими преимущественно в осадочной толще земной коры.

Ключевые слова: Грязевой вулкан Локбатан, грязевой вулкан Отман-Боздаг, цифровые сейсмические станции.

Для цитирования: Етирмишли Г.Д., Казымова С.Э. Извержение грязевого вулкана «Локбатан». *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(1): 22–33. DOI: 10.46698/VNC.2023.14.41.002.

Introduction

Although studies of the nature of mud volcanoes in Azerbaijan have always been topical, the problems of their spatio-temporal relationship with seismicity have not been widely discussed. The first catalog of recorded eruptions of mud volcanoes in Azerbaijan for the period 1810-1974 was published 45 years ago. Then the data on the eruptions of mud volcanoes in Azerbaijan were summarized in the work of Rakhmanov R.R. In addition, information about the eruptions of mud volcanoes in the whole world in 1982 was also collected in the catalog given in the work of Rakhmanov R.R. (1987). In 2009, Aliyev A.A., Guliyev I.S. and Rakhmanov R.R. the catalog of eruptions of mud volcanoes of Azerbaijan for 1810-2007 was created. In 2015 Aliyev A.A., Guliyev I.S., Dadashev F.G. and Rakhmanov R.R. The Atlas of Mud Volcanoes of the World was published [Aliyev et al., 2009; Yusubov, Guliyev, 1971].

The works [Ahmedbeyli, 1975; Panahi, Rakhmanov, 1993; Aliyev et al., 2002] Aliyev 2004-2009, Guliyev, 2018, etc.) note the connection between mud volcanism and oil and gas accumulation processes, where it is indicated that the patterns of their distribution and structural localization are one of the important criteria for the selection of priority objects for prospecting and exploration for oil and gas in the depression zones of mobile belts. Hazardous processes are currently being investigated by a variety of methods [Zaalishvili et al., 2014a, b; 2016]. Obviously, this problem is of great scientific and practical importance. From a fundamental point of view, such studies are necessary to understand the conditions and mechanism of formation of mud volcanoes. From a practical point of view, they are of interest in connection with the problem of seismic hazard assessment, which includes general seismic zoning, detailed seismic zoning, and microzoning. This topic is of particular importance at the present stage, when the intensive development of oil and gas fields, the development of the agro-industrial complex and urban agglomerations of Azerbaijan are planned. Lokbatan is one of the settlements located not far from Baku. Since 1810, 26 eruptions have been recorded. One of its largest eruptions occurred in 1977. A strong emission of dirt and gas was observed. The eruption began in the early morning when the surroundings resounded with a roar. A powerful explosion soon followed. A column of fire 350 m high rose above the top of the volcano. This ignited a gas jet escaping from the depths of the earth. The volcano threw out a huge amount of volcanic mud that covered the surrounding area. Due to its size and activity, the volcano has been a candidate for inscription on the UNESCO World Heritage List since 1998. It is important to note that Azerbaijan ranks first in the world in terms of the number of mud volcanoes. However, it is the mud volcano Lokbatan that is closely associated with the oil industry.

Eruptions of mud volcanoes of Azerbaijan

Mud volcanoes in East Azerbaijan are located within 6 oil and gas regions: Caspian-Guba, Shamakhi-Gobustan, Absheron (including the Absheron Peninsula and the Absheron archipelago), Low Kura and in the Baku archipelago (fig. 1).

The highest intensity of mud volcanic activity, excluding events on marine mud volcanoes, was observed in the Shamakhi-Gobustan region, on the Absheron peninsula and the Baku archipelago, which is about 86% of the total number of recorded eruptions in Azerbaijan [Dadashev et al., 1995]. It should be noted that in these areas of development of mud volcanism, the thickness of Maikop deposits is more than 1000 meters (1000-2300 m).

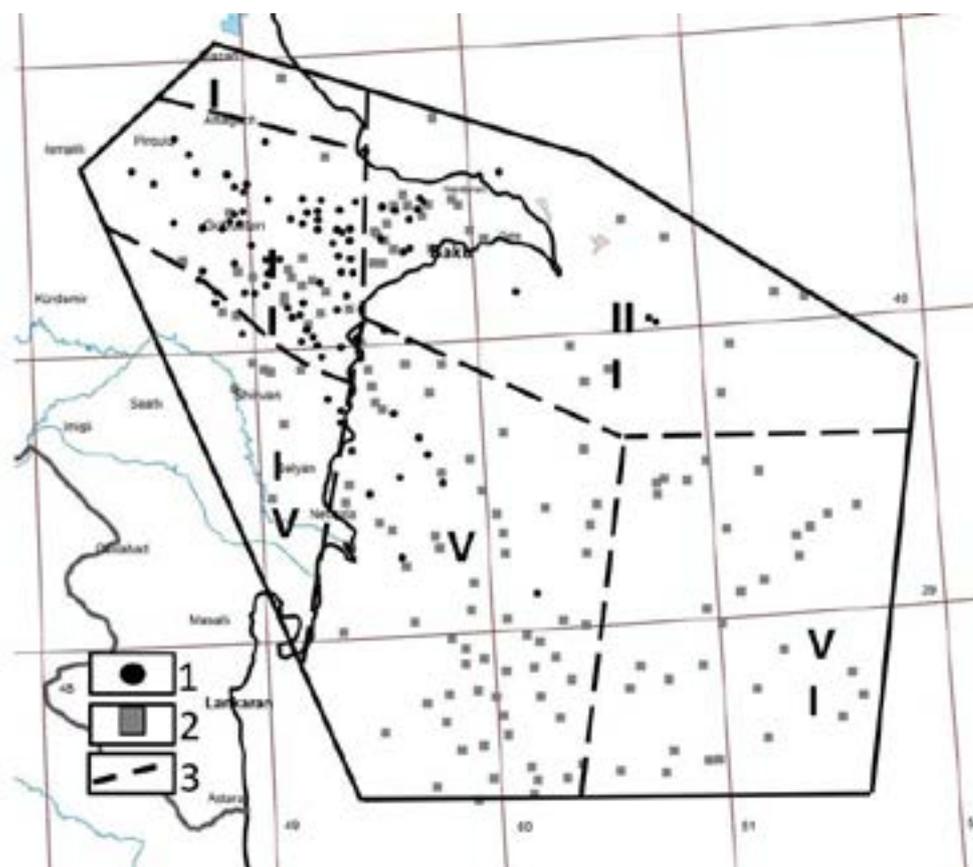


Fig. 1. Location map of mud volcanoes in Azerbaijan [Aliyev et al., 2015]: 1 – Identified volcanoes; 2 – Suspected volcanoes. Oil and gas prospect zones: I – Caspian-Guba; II – Shamaxi-Gobustan; III – Absheron; IV – Low Kura; V – Baku archipelago; VI – Southe Caspian

Morphologically, mud volcanoes are hills of various heights, having a regular shape of a truncated cone. Volcanic manifestations are extremely diverse in size: from the largest hills hundreds of meters high with large fields of mud volcanic breccias, in some cases reaching 40-60 sq. km in area (Kelany, Akhtarma-Pashaly), to small ones, often not distinguished in the relief hill fields and represented by groups of griffins anddsalz, with a total area of several hundred square meters. Otman-Bozdag (404 m) and Toragay (399 m) volcanoes located in the eastern part of Central Gobustan are the highest mud volcanoes in the world [Aliyev et al., 2009, 2015; Planke et al., 2006].

During the eruptions of mud volcanoes, an underground rumble or a thunderous roar is heard, after which an explosion occurs, the release of mud volcanic breccia to the surface and spontaneous combustion of hydrocarbon gases with the formation of a flame column up to 50-200 m high. The combustion temperature at this time reaches 1000-1200°. Around the small particles of rocks turn into slag. Periodically, as if in separate “portions”, along with fire high into the sky through the vent connecting the crater with the volcano, a huge amount of breccia is ejected. Having reached its apogee at a height of about 80-200 m, the entire mass of erupted breccia covers the crater of the volcano. If gases and water are able to make their way (when the volcano channel is not clogged with breccia), then over time, microforms appear – active gryphons and salses, mainly associated with the

apophyses of the volcano's vent. Similar structures are found on the Dashgilmud volcano [Kopf et al., 2010; Mazzini et al., 2009].



Fig. 2. Numerous griffins of the mud volcano Dashgil

Mud volcano "Lokbatan"

Lokbatan is one of the most famous mud volcanoes worldwide due to its frequent fiery eruptions. It is located about 30 km southwest of Baku in the Absheron region. It is located within the anticlinal structure of Lokbatan Put, which also hosts other mud volcanoes (including Shongar, Akhtarma, Kushkhana). Lokbatan has an elongated shape, coinciding with the direction of the anticline axis, and its mud breccia flows cover an area of about 5 km². For 199 years (1824-2022), 102 eruptions were recorded on 13 volcanoes on the Absheron Peninsula. At the same time, almost half of them fall on the Lokbatan and Keireki volcanoes. Since the beginning of recording the activity of mud volcanoes, about 25 of its eruptions have been recorded. In 1888, Yalmer Sjogren published the first information about the eruption of the mud volcano Lokbatan. According to [Aliyev et al., 2002, 2009, 2015; Mazzini et al., 2021], almost all of its eruptions are accompanied by the release of a large amount of mud volcanic breccia with a volume of about 250 thousand m³ [Aliyev et al., 2009] onto the day surface, a powerful gas column with its subsequent ignition (fig. 3). The height of the flame is estimated at 100 to 300 m. Ejections of the mud volcano are mainly represented by clays of the Maikop series, fragments of overlying sandstones and limestones make up only 7-8% of the total volume of igneous rocks. Naturally, the mud volcanic breccia may contain fragments of rocks younger than the Oligocene age, because the vent is in contact with them along the entire height of the vent. The presence of rocks older than the Oligocene in the composition of the volcanic breccia is due to the removal of terrigenous material from the territories adjacent to the Maikop sedimentation basin, that is, they are allochthons.

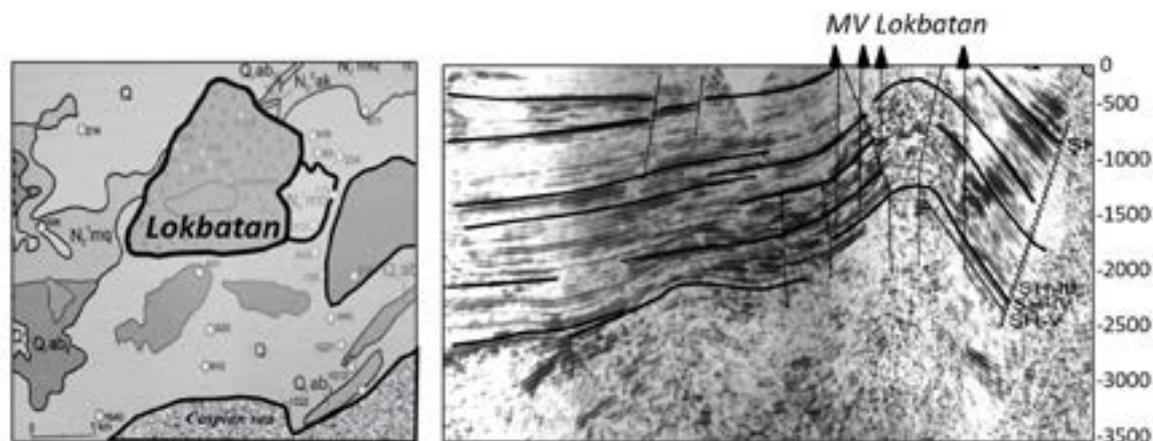


Fig. 3. Location of the mud volcano Lokbatan on the geological map and deep seismic section [Aliyev et al., 2015]

One of the most spectacular eruptions occurred on October 21, 2001 [Mukhtarov et al., 2003; Planke et al., 2006; Stogny et al., 2022] with a strong release of burning methane, followed by a massive mud breccia flow that covered the surface with an area of $\sim 0.1 \text{ km}^2$. On the margins of the main crater, depressions several meters in scale were observed, which were interpreted as impacts of large mud breccias ejected during this latest eruption. Large fragments (up to 0.5 m in size) can be observed everywhere in mud-flows. The main flow extends to the NW and is framed by vertical displacement walls, the direction and orientation of which coincide with the direction and orientation of the axis of the anticline containing Lokbatan and other mud volcanoes. This tectonic control determines the elongated shape of the mud volcano [Bonini, 2012]. Huge blocks of mud breccia are also present within the stream. Planke et al. [Planke et al., 2006] also suggested that this collapse is tectonically controlled by fold orientation and volumetrically dependent on post-eruption deflation of the shallow chamber. Field observations indicated that this deflation was still ongoing in the crater between 2005 and 2006, as evidenced by signs of progressive collapse within the crater. After the 2001 eruption, burning methane vents and diffuse seepage were observed for several years [Etiope et al., 2004, 2009; Planke et al., 2003], but their intensity decreased over time. No burning vents were observed in 2005, and portable methane sensors did not register concentrated and corresponding gas plumes. Lokbatan is one of the most active MVs that periodically erupt with a cycle of $\sim 5\text{-}8$ years. The first documented eruption of Lokbatan dates back to 1829. Other major eruptions have been documented in 1829, 1864, 1887, 1890, 1900, 1904, 1915, 1918, 1923, 1926, 1933, 1935, 1938, 1941, 1954, 1959, 1972, 1977, 1990, 2020, 2012, 2017, 2018, 2022 [About the eruption of the mud volcano Lokbatan, 1938; New awakening of Lokbatan volcano..., 1978; Aliyev et al., 2015] (Fig. 4). The high rate of eruptions and the apparent absence of significant seeps suggest that Lokbatan is able to block the main overpressure that occurs at depth and promote a shorter and stronger eruption [Mazzini et al., 2021]. The eruption on September 20, 2012 was no exception for the volcano, and despite the fact that only 2 years have passed since its previous eruption (February 4, 2010), it surpassed it both in strength and power.



Fig. 4. Eruption of the mud volcano Lokbatana. (A) Eruption of mud volcanic breccia after the eruption on August 11, 2022. b) Google Earth image on October 22, 2022. Red arrows indicate fused fragments of older cones and young craters

The satellite image obtained by Google Earth shows an elongated shape with the last debris flow extending to the west (darker colored mud breccia). The elongated structure of the graben frames the mudflow with numerous production wells located in the environment. According to ArcGIS10.8.1. and Surfer10, a three-dimensional model of the Lokbatan mud volcano was built (Fig. 5). The volume of the mud volcanic structure of the Lokbatan mud volcano according to GIS data is $997 \cdot 10^{-5} \text{ km}^3$.

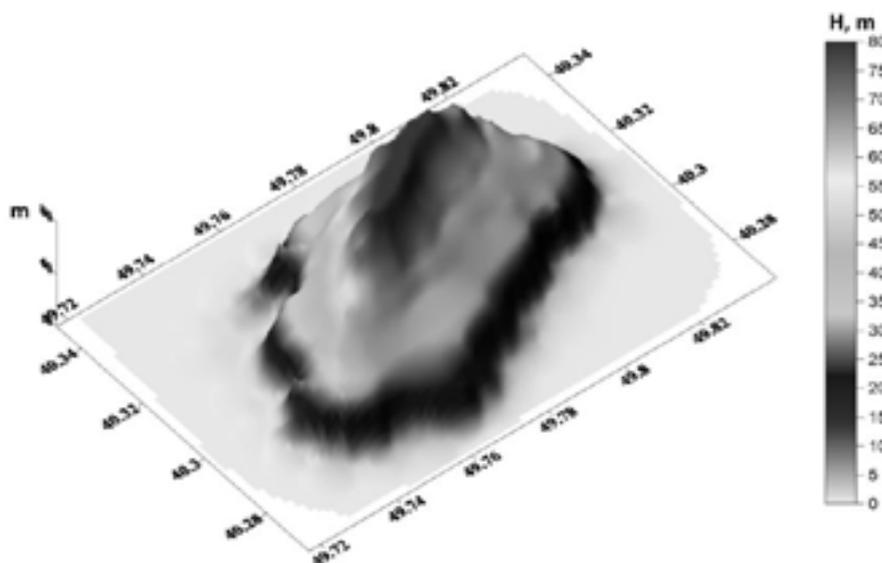


Fig. 5. Mud volcano Lokbatan 3D model

Field observations show the presence of large (up to $\sim 50,000 \text{ m}^3$) layered blocks, which were originally part of a large crater cone. These blocks were fused $> 1 \text{ km}$ from the vent over mud breccia flows. [Koronovsky, 2018; Veliev, 2021; Mazzini et al., 2021]. The presence of large cohesive blocks is not unique to the Lokbatan Mud Volcano and has been documented in other large-scale structures both onshore and offshore.

Methods of determination of the parameters of the mud volcano Lokbatan

Along with the development of scientific and practical issues of mud volcanism, serious attention was paid to mud volcanic eruptions, their fixation, with the characteristics of the natural process, as well as the study of volcanic ejecta products (breccias, fluids). Each eruption of a mud volcano is new information, “news” about the processes taking place in the bowels. Unfortunately, due to the short duration of the process of mud volcanic eruption, it is practically not always possible to observe and trace the entire mechanism of this phenomenon from beginning to end. Usually, geologists find out about this with some delay and on the volcano, especially if it is located far from settlements, they come after the end of the eruption. And how this process took place is mainly described from the words of eyewitnesses.

Thanks to the high resolution of digital seismic equipment manufactured by Kinemetrics (USA) of the RSSC, since 2008 it has become possible to record and analyze records of mud volcano eruptions, namely, to determine the time and duration, the number of phases, and the focus depth and the energy of a mud volcano eruption. To date, there are 35 digital seismic stations on-line in Azerbaijan and 10 strong motion stations located within the Absheron Peninsula.

In addition, 17 new digital seismic stations were installed in 2017 as part of a joint international project of the RSSC, the University of Missouri (USA) and the Ukrainian Scientific and Technical Center “Caucasus Transect” to study the velocity inhomogeneities of the earth’s crust.

In addition, in 2022, within the framework of the international project “Expansion of the seismic network in the Caucasus and Central Asia”, implemented with the support of the Ukrainian Scientific and Technical Center, 22 seismic stations manufactured by Nanometrics (Canada) were installed in Azerbaijan. For the first time in the world, in order to study the dynamics of mud volcanoes, 12 such stations were installed around the mud volcanoes Lokbatan and Otman-Bozdag (Fig. 6).

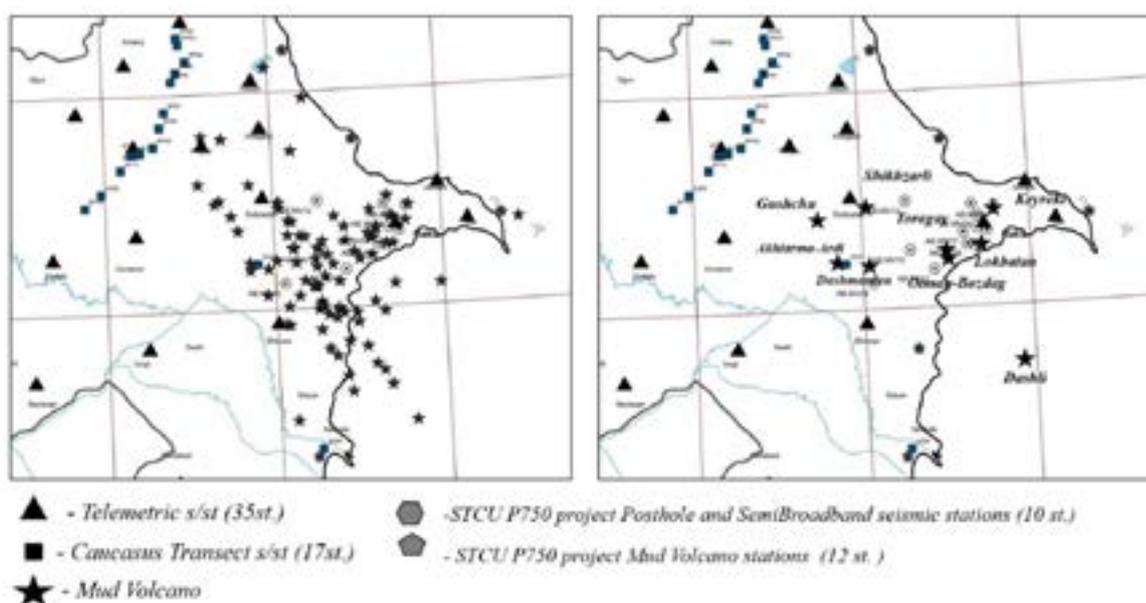


Fig. 6. Location map of digital seismic stations and active mud volcanoes in Azerbaijan

Thus, according to the data of seismo-telemetric stations, the process of eruption of the mud volcano Lokbatan was registered.

Results

Note that the first digital data of the Lokbatan volcano eruption were recorded in 2010. Compared to the previous ones, the February 4, 2010 eruption was much weaker. It began in the morning with an underground rumble, as always with an explosion, but without gas ignition, and a short-term release of volcanic breccia onto the earth's surface, which, flowing down the slope, covered an area a little over one hectare. The eruption of the volcano during the day was characterized by 4 phases of activation recorded only by one nearby seismic station "Gobu". The first one took place in the morning, at 9:30 am (which lasted 4.5 minutes), followed by 1:10 pm, 4:30 pm and 8:05 pm (about 5 minutes long). 09:47:05 – 09:50:15 and 12:48.10 – 12:52:00 respectively. In addition, on the night of February 5, another, as it were, instantaneous activation of volcanic activity was established at the time of 00:08:49 – 00:08:50.8. Due to the lack of sufficient material, the depth of the eruption and the released energy could not be determined.

On September 20, 2012, the next 24th eruption of this volcano occurred. It was recorded by seismic stations "Gobu", "Nardaran", "Gala", "Gobustan", "Ali-Bayramly", "Altyagach", "Pirgulu" and "Siyazan". The eruption began with the release of steam and breccia, at first to a small height, and then the process became more intense, fluids and breccia were ejected to a height of about 100 m. The phase ended with the ignition of the main plume (Fig. 7).



Fig. 7. Fire torch during the eruption of the mud volcano "Lokbatan"

The volcanic eruption of 2012 during the day was characterized by 3 periods of activation. The first one occurred in the morning at 04:59:17.7 (eruption duration 7 minutes, focus depth 5 km, $E=0.64 \times 10^7$ J), the next ones at 09:14:40 (eruption duration 4 minutes, focus depth 5.5 km, $E=0.70 \times 10^7$ J) and at 09:23:00 (duration of eruption 12 minutes, focus depth 1.2 km, $E=3.15 \times 10^7$ J).

On May 2, 2017 at 08:55:51 another strong eruption of the Lokbatan volcano occurred. The duration of the eruption was 4 minutes, the depth of the focus was 4 km. The released energy was $E=1.12 \times 10^7$ J.

The last eruption of this volcano occurred on August 11, 2022. In fig. Figure 8 shows the wave record of the eruption obtained at the new digital stations of the SeisComp4 system. The thickness of the outflowing cover of mud was 80-90 cm with an area of up to 4 hectares. The eruption began in the morning at 09:36:35. The depth of the eruption was

3 km, and the released energy was 0.6×10^7 J. As can be seen in fig. The duration of the eruption was 5 min. 12 sec.

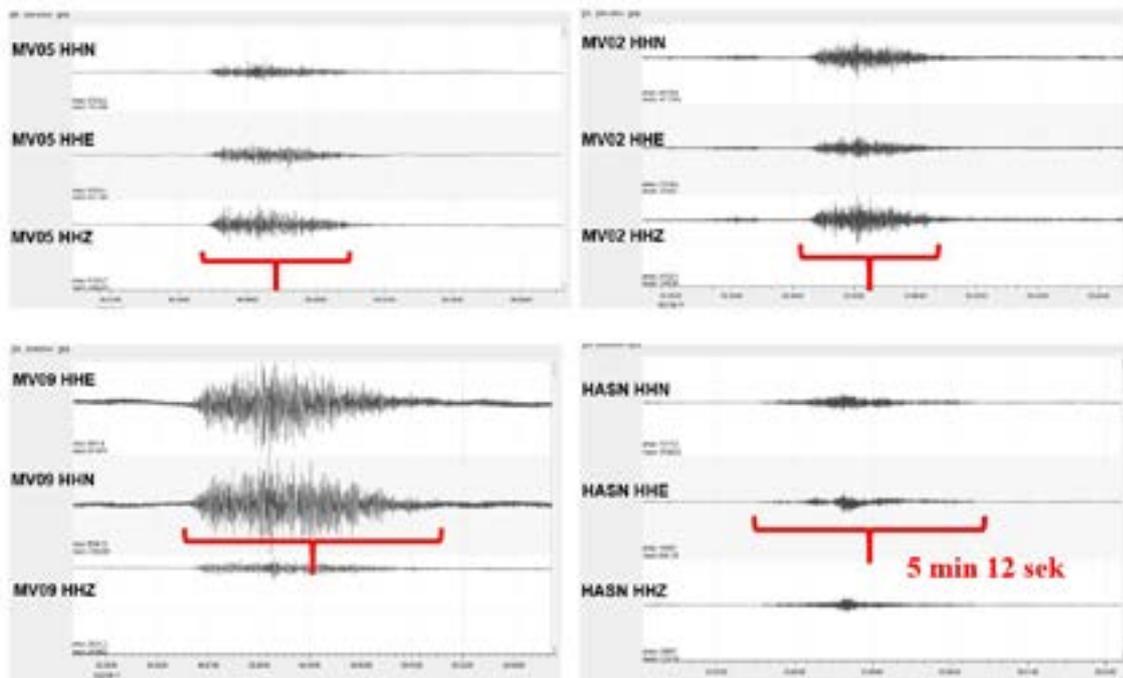


Fig. 8. Lokbatan mud volcano eruption on 11 August 2022

Analysis of the spectrograms of wave images of the Lokbatan mud volcano eruption for 2010, 2012, 2017 and 2022 obtained at the Gobu digital station showed that the eruption fluctuates in the frequency range $f=0.3-3.0$ Hz.

The results of the work and their discussion

In recent decades, many scientists, conducting research, began to realize the connection between mud volcanism and seismicity. Significant results in this matter are presented in the works. Considering the relationship between mud volcano eruptions and earthquakes, F.S. Ahmedbeyli (1975) [Ahmedbeyli, 2004] argued that seismic shocks create favorable conditions and can contribute to the eruption of mud volcanoes. It is also noted that in some cases, mud volcano eruptions and earthquakes coincide in time, and sometimes the interval between events is several days.

Despite the fact that before the eruption of the mud volcano Lokbatan on August 11, 2022, no earthquakes were observed within a radius of 50 km, however, a day later, on August 12, an earthquake with a magnitude of 3.5 occurred in the Caspian Sea, 60 km NE from the volcano. After analyzing the source mechanism data for 2022, the Lode-Nadai stress state coefficient was calculated. It was found that both the Lokbatan volcano and the earthquake source are in a zone of stressed state of compression. Based on Kulikov's theory that the change in the hydrodeformation field manifests itself where the earth's crust is under compression and its volume is reduced, resulting in an increase in the water level in the wells, it can be assumed that the geodynamic situation of the study region, characterized by compression in 2022, has become caused both the eruption on August 11, 2022, and the earthquake on August 12, 2022.

Conclusions

Thus, summing up the research, it was found that the eruption of the mud volcano Lokbatan in 2012 was characterized by 3 periods of activation at a depth of 4 km. The released energy was $E=1.12 \cdot 10^7$ J. The depth of the eruption on May 2, 2017 is 4 km. The last eruption of this volcano, which occurred on August 11, 2022, was characterized by a depth of 3 km, and the released energy was $0.6 \cdot 10^7$ J. Analysis of the spectrograms of wave images of the Lokbatan mud volcano eruption for 2010, 2012, 2017 and 2022 obtained at the Gobu digital station showed that the eruption fluctuates in the frequency range $f=0.3-3.0$ Hz. Based on the above data from the analysis of igneous rocks, registration by telemetry stations of seismic events that occurred during the eruption, as well as geophysical studies. In [Kazimova et al., 2012], a conceptually new model of the internal structure was proposed – a multi-chamber structure of the Lokbatan mud volcano. In addition, the idea about the stage-by-stage process of the formation of mud volcanic breccia and its final formation in the near-surface zone, which was expressed earlier, was confirmed. It has been suggested that at least two mud volcanic chambers are located at depths of 1.2-3 km and 4-6 km and practically coincide with the above seismic sources. The upper one corresponds (depth 1.2 km) to the Pleistocene deposits of the Quaternary system (Absheron stage), and the second corresponds to the Pliocene deposits (productive stratum) of the Neogene system (5 km), saturated with hydrocarbons. This may well explain the presence of such a large amount of gas that ignites during all recorded eruptions of the Lokbatan mud volcano, including the eruption of September 20, 2012 and May 2, 2017. The centers of development of mud volcanoes are located mainly at depths of 1-6 km, i.e. the development of mud volcanoes is associated with active internal processes occurring mainly in the sedimentary strata of the earth's crust.

Referenses

1. About the eruption of the mud volcano Lok Batan. *Izv. AzFAN USSR*. 1938. No.3. p. 109. 158. (In Russ.)
2. Ahmedbeyli F.S. Modern activity of mud volcanoes in the eastern part of Azerbaijan and its connection with seismicity. *Report AN Azerbaijan*. 1975. Vol. 31. No. 8. pp. 61-64. (In Russ.)
3. Ahmedbeyli F.S. Neotectonics and some aspects of the late orogenic geodynamics of Azerbaijan. ANAS, Institute of Geology. Bib-ID vtls000110488. Baku: Nafta-Press, 2004. 269 p.
4. Aliyev Ad.A., Guliev I.S., Belov I.S. Catalog of recorded eruptions of mud volcanoes (1810-2001). Baku. Nafta-Press, 2002. p. 94.
5. Aliyev Ad.A., Guliev I.S., Rakhmanov R.R. Catalog of Azerbaijan mud volcano eruptions (1810–2007). Baku. Nafta-Press, 2009. p. 110.
6. Aliyev Ad.A., Guliyev I.S., Dadashev F.G., Rakhmanov R.R. Atlas of mud volcanoes of the world. Baku. Nafta-Press, 2015. 322 p.
7. Bonini M. Mud volcanoes: indicators of stress orientation and tectonic con-trols. *Earth-Sci. Rev.* 2012. Vol. 115(3). pp. 121-152.
8. Dadashev F.G., Guseynov R.A., Aliev A.I. Map of Mud Volcanoes of the Caspian Sea. Academy of Sciences of Azerbaijan Republic, Geology Institute. 1995. 15 p.
9. Etiop G., Feizullayev A.A., Baci C.L., Milkov A. Methane emission from mud volcanoes in eastern Azerbaijan. *Geology*. 2004. Vol. 32. No.6. pp. 465-468.
10. Etiop G., Feyzullayev A., Milkov A.V., Waseda A., Mizobe K., Sun C.H. Evidence of subsurface anaerobic biodegradation of hydrocarbons and potential secondary methanogenesis in terrestrial mud volcanoes. *Marine and Petroleum Geology*. 2009. Vol. 26. No.9. pp. 1692-1703.
11. Kazimova S.E., Khasayeva A.B., Huseynov A.R. Earth sciences Definition of the mud

volcanoes- eruption focuses by data of records of the digital seismic stations. Reports of ANAS. 2015. Vol. LXXI. No.3. pp. 59-62

12. Kopf A., Delisle G., Faber E., Panahi B., Aliyev C.S., Guliyev I. Long-term in situ monitoring at Dashgil mud volcano, Azerbaijan: a link between seismicity, pore-pressure transients and methane emission. *Int. J. Earth Sci.* 2010. Vol. 99(1). pp. 227–240.

13. Koronovsky N.V. Keli volcanic highland (Central Greater Caucasus). *Geology and geophysics of the South of Russia.* 2018. No.1. pp. 56-68. DOI: 10.23671/VNC.2018.1.11248 (In Russ.)

14. Mazzini A., Akhmanov G., Manga M., Sciarra A., Huseynova A., Guliyev I. Explosive mud volcano eruptions and rafting of mud breccia blocks. *Earth and Planetary Science Letters.* 2021. Vol. 555. p. 116699.

15. Mazzini A., Svensen H., Planke S., Guliyev I., Akhmanov G.G., Fallik T., Banks D. When mud volcanoes sleep: insight from seep geochemistry at the Dashgil mud volcano, Azerbaijan. *Mar. Pet. Geol.* 2009. Vol. 26(9). pp. 1704–1715.

16. Mukhtarov A., Kadirov F., Guliyev I., Lerche I., Feyzullayev A. Temperature variations in the Lokbatan mud volcano crater (Azerbaijan) after the eruption in 25 October 2001. *Energy Exploration and Exploitation.* 2003. Vol. 21. pp. 187-207. DOI: 10.1260/014459803769520043

17. New awakening of Lokbatan volcano. No.3, p. 74-75. 156. A new island in the Caspian Sea. *Gas. "Sev. pchela"*, 1861. 1978. No.131. p. 157. (In Russ.)

18. Panahi B.M., Rakhmanov R.R. Mud volcanic earthquakes. *Volcanology and seismology.* 1993. No.2. pp. 98-103.

19. Planke S., Mazzini A., Svensen H., Akhmanov G.G., Malthe-Sorensen A. Mud Volcanoes in Azerbaijan. In: *Implications for Sediment and Fluid Migration in Active Piercement Structures.* Publisher: Springer. 2006. pp. 205-214.

20. Planke S., Svensen H., Hovland M., Banks D., Jamtveit B. Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan. *Geo-Marine Letters.* 2003. Vol. 23. pp. 258-268.

21. Stogny V.V., Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Ponomareva N.L. Modern geodynamics and seismicity of the North Caucasus: problems of monitoring. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2022. Vol. 12. No.2. pp. 34-52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003. (in Russ.)

22. Veliev G.O. The role of geodynamic stress in the formation of oil and gas structures in the Caspian Sea (on the example of the Shah Deniz, Umid, Babek, Bulla Deniz fields). *Geology and Geophysics of Russian South.* 2021. Vol. 11. No.2. p. 36-50. DOI: 10.46698/VNC.2021.68.77.003 (In Russ.)

23. Yusubov N.P., Guliyev I.S. Mud volcanism and hydrocarbon systems of the South Caspian depression. *Baku. Elm,* 2022. 168 p.

24. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Mel'kov D.A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of northern Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth,* 2014a. Vol. 50(2). pp. 263–272.

25. Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth,* 2014b. Vol. 50(5). pp. 707–718.

26. Zaalishvili V., Melkov D., Kanukov A., Dzeranov B. Spectral-temporal features of seismic loadings on the basis of strong motion wavelet database. *International Journal of GEOMATE.* 2016. Vol. 10(1). pp. 1656–1661.

ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК: 551.24

DOI: [10.46698/VNC.2023.42.57.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.42.57.003)

Оригинальная статья

Складчато-надвиговые дислокации в триасовых отложениях Скифско-Туранской платформы

В.И. Попков , И.В. Попков Кубанский государственный университет, Россия, 350049, г. Краснодар,
ул. Ставропольская, д. 149, e-mail: geoskubsu@mail.ru

Статья поступила: 04.02.2023, доработана: 06.03.2023, одобрена в печать: 13.03.2023

Резюме: Актуальность работы. С триасовыми отложениями Скифско-Туранской платформы связаны основные перспективы открытия новых скоплений углеводородов. Несмотря на многолетнюю историю исследований, многие вопросы геологического строения этого комплекса остаются недостаточно разработанными. Одним из них является строение антиклинальных структур – главных поисковых объектов на нефть и газ. Вплоть до настоящего времени преобладает точка зрения орешающей роли в их формировании вертикальных тектонических движений. В то же время в последние годы появляется все больше свидетельств о наличии в триасовом разрезе дислокаций, образовавшихся под воздействием сил бокового сжатия. Одним из таких районов является Жетыбай-Узеньская ступень Южно-Мангышлакского прогиба. Изучение особенностей строения развитых здесь складок и разрывов позволит решить вопрос механизма их формирования и раскрыть генезис внутриплитных дислокаций. **Цель исследований.** Изучение морфологии складчатых и разрывных нарушений северного борта Южно-Мангышлакского прогиба с целью определения их морфологии и условий образования. **Методы исследования.** Комплексный анализ геолого-геофизической информации, включающей в себя материалы сейсмической разведки, глубокого бурения. Выполнено макро- и микроописание кернов скважин. Произведены литолого-стратиграфическое расчленение и корреляция разрезов скважин с использованием данных всех видов каротажа, палеонтологических определений органических остатков. Используются материалы сейсморазведки МОГТ с высокой кратностью наблюдений. Применены методы сейсмостратиграфии и структурного анализа. **Результаты работы.** Проведенные исследования свидетельствуют об определяющей роли тангенциального сжатия в формировании структуры триасовых отложений. Описана морфология конкретных складчато-надвиговых дислокаций, а также послонных срывов. Полученные результаты могут способствовать решению ряда вопросов нефтяной геологии, выбору рациональной методики геологоразведочных работ. Материалы исследований могут быть использованы при изучении геологического строения других менее изученных районов молодой платформы.

Ключевые слова: антиклиналы, надвиги, тангенциальное сжатие, ловушки, нефть и газ.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-27-00037.

Для цитирования: Попков В.И., Попков И.В. Складчато-надвиговые дислокации в триасовых отложениях Скифско-Туранской платформы. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(1): 34-46. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.57.003.

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

DOI: [10.46698/VNC.2023.42.57.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.42.57.003)

Original paper

Fold-thrust dislocations in Triassic sediments The Scythian-Turanian platform

V.I. Popkov¹, I.V. Popkov²

Kuban State University, 149 Stavropol str., Krasnodar 350059, Russian Federation,
e-mail: geoskubsu@mail.ru

Received: 04.02.2023, revised: 06.03.2023, accepted: 13.03.2023

Abstract: Relevance. The main prospects for the discovery of new accumulations of hydrocarbons are associated with the Triassic deposits of the Scythian-Turanian platform. Despite the long history of research, many issues of the geological structure of this complex remain insufficiently developed. One of them is the structure of anticline structures – the main search facilities for oil and gas. Until now, the prevailing point of view is about the decisive role of vertical tectonic movements in their formation. At the same time, in recent years there has been more and more evidence of the presence of dislocations in the Triassic section formed under the influence of lateral compression forces. One of these areas is the Zhetybai-Uzen stage of the South Mangyshlak trough. Studying the structural features of the folds and ruptures developed here will solve the problem of the mechanism of their formation and reveal the genesis of intraplate dislocations. **Aim.** To study the morphology of folded and discontinuous disturbances of the northern side of the Yuzhno-Mangyshlak trough in order to determine their morphology and conditions of formation. **Methods.** Comprehensive analysis of geological and geophysical information, including materials of seismic exploration, deep drilling. Macro- and micro-description of well cores has been performed. Lithological and stratigraphic dissection and correlation of well sections were performed using data from all types of logging, paleontological definitions of organic residues. The materials of the seismic survey of MOGT with a high frequency of observations were used. Methods of seismostratigraphy and structural analysis are applied. **Results.** The conducted studies indicate the determining role of tangential compression in the formation of the structure of Triassic sediments. The morphology of specific fold-thrust dislocations, as well as layer-by-layer disruptions, is described. The obtained results can contribute to the solution of a number of issues of petroleum geology, the choice of rational methods of geological exploration. The research materials can be used in the study of the geological structure of other less studied areas of the young platform.

Keywords: anticlines, thrusts, tangential compression, traps, oil and gas.

Acknowledgements: The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-27-00037.

For citation: Popkov V.I., Popkov I.V. Dislocations of lateral compression in the cover of the Scythian-Turanian platform (on the example of the Eastern Mangyshlak). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(1): 34-46. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.57.003.

Введение

По мере истощения запасов нефти и газа в верхних горизонтах разреза осадочных бассейнов поисково-разведочные работы смещаются на большие глубины, имеющие, как правило, более сложное геологическое строение. Это в полной мере относится и к Скифско-Туранской платформе, основные перспективы нефтегазоносности которой связаны с триасовыми отложениями [Харченко и др., 2022; Хасанов

и др., 2020]. При производстве геологоразведочных работ в доюрском разрезе продолжают преобладать методические подходы к поиску скоплений углеводородов, применявшиеся для платформенного чехла. Считается, что образование антиклинальных ловушек связано с вертикальными тектоническими движениями. Отсюда следует закономерный, но зачастую ошибочный вывод о плановом совпадении сводов поднятий в чехле и подстилающем комплексе пород.

Роль тангенциального сжатия в формировании структуры мобильных поясов убедительно доказана многочисленными работами как российских, так и зарубежных геологов и геофизиков [Гиоргобиани, 2019, 2020; Borderie et al., 2019; Carola et al., 2015; Jourdon et al., 2020; Li et al., 2012; Nelepov et al., 2021; Roeder, 2010; Sobornov, 1996, 2020; Yu et al., 2014; Xu et al., 2004]. Изучение структуры чехла разновозрастных платформ показало, что в его строении также широко развиты дислокации, образовавшиеся под воздействием сил бокового сжатия [Казанцева, 2020; Камалетдинов и др., 1981; Попков, 1990; Попков, 1991 и др.]. Широко представлены подобного типа структуры и в пределах эпигерцинской Скифско-Туранской платформы, изученные с разной степенью детальности [Исмагилов и др., 1991; Попков, 1990]. Одним из районов развития в доплитном комплексе складчато-надвиговых дислокаций является Жетыбай-Узеньская ступень, осложняющая северный борт Южно-Мангышлакского прогиба. Изучение ее морфологии может способствовать более глубокому пониманию механизма складкообразования в осадочном покрове внутренних районов платформ, а также решить некоторые вопросы практической нефтегазопроисковой геологии [Zaalishvili et al., 2014a, b; 2016].

Методы исследований

Для решения поставленной задачи был произведен комплексный анализ имеющейся к настоящему времени геолого-геофизической информации по строению триасовых отложений Жетыбай-Узеньской ступени. Выполнено макро- и микроописание кернов скважин. Произведены литолого-стратиграфическое расчленение и корреляция разрезов скважин с использованием данных всех видов каротажа, палеонтологических определений органических остатков. Максимально использовались материалы сейсморазведки МОГТ (метод общей глубинной точки) с высокой кратностью наблюдений. Применены методы сейсмостратиграфии и структурного анализа. Ниже приведены основные полученные результаты.

Результаты исследований

В платформенном чехле Жетыбай-Узеньской ступени, осложняющей северный борт Южно-Мангышлакского прогиба, выделяется три крупных антиклинальных зоны субширотного простирания: Узень-Карамандыбасская (протяженность 70 км), Жетыбайская (45 км) и Тенге-Тасбулатская (70 км), а также небольшая по размерам Актаская (12 км), ориентированная в северо-западном направлении (рис. 1). Входящие в их состав локальные поднятия – линейной формы, с более крутыми, часто осложненными разрывами южными крыльями. В плане антиклинальные зоны имеют дугообразную форму, обращенную выпуклой стороной к югу (Актаская – к юго-западу).

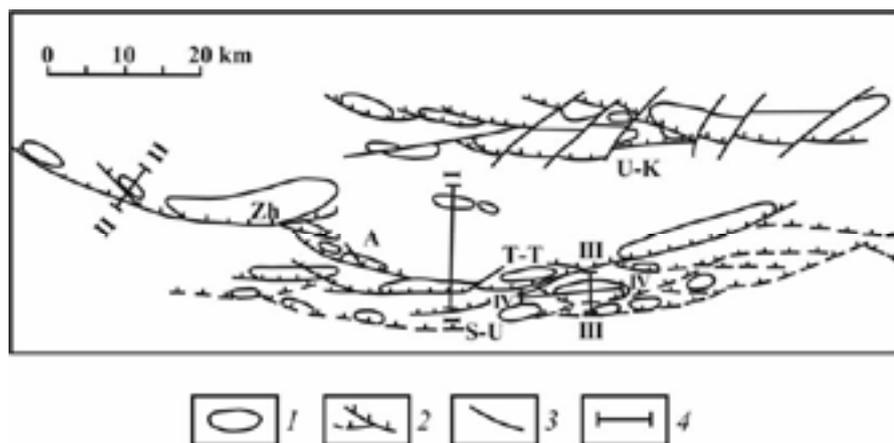


Рис. 1. Жетыбай-Узенская ступень. Тектоническая схема подошвы платформенного чехла.

Антиклинальные зоны: У-К – Узень-Карамандыбасская, Ж – Жетыбайская, А – Актасская, Т-Т – Тенге-Тасбулатская, С-У – погребенная Саукудук-Ушкунская. 1 – локальные поднятия, 2 – надвиги, 3 – прочие разрывы, 4 – линии разрывов, приведенных на рисунках 2, 4 – 6 /

Fig. 1. Zhetysai-Uzen stage. Tectonic scheme of the sole of the platform cover. Anticlinal zones: U-K – Uzen-Karamandybas, Ж – Zhetysbayskaya, A – Aktsskaya, T-T – Tenge-Tabulata, C-U – buried Saukuduk-Uskuaya. 1 – local uplifts, 2 – thrusts, 3 – other breaks, 4 – lines of cuts shown in Fig. 2, 4-6 /

Анализ материалов сейсморазведки МОГТ и глубокого бурения указывает на то, что в доюрском осадочном комплексе указанным выше антиклиналям отвечают фронтальные части чешуйчато-надвиговых дислокаций, группирующиеся в отдельные линейные зоны. В пределах головных частей тектонических пластин триасовые отложения интенсивно смяты, а их внутренняя структура на сейсмических временных разрезах зачастую не поддается расшифровке (рис. 2).

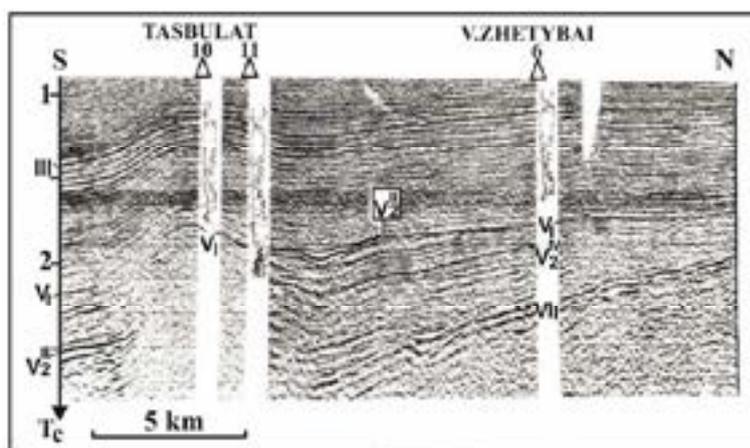


Рис. 2. Временной сейсмический разрез по линии Восточный Жетыбай – Тасбулат, иллюстрирующий строение мезозойских отложений Жетыбай-Узенской ступени. Отражающие горизонты: III – подошва неокома; V₁ – подошва юры, V₂^{II} – кровля карбонатного комплекса среднего триаса, V₂^{IV} – подошва карбонатного комплекса среднего триаса, VI₁ – подошва нижнего триаса /

Fig. 2. A temporary seismic section along the Tasbulat – Vostochny Zhetybai line, illustrating the structure of Mesozoic deposits of the Zhetysai-Uzen stage.

Reflecting horizons: III – the sole of the Neocomian; V₁ – the sole of the Jurassic, V₂^{II} – the roof of the carbonate complex of the Middle Triassic, V₂^{IV} – the sole of the carbonate complex of the Middle Triassic, VI₁ – the sole of the lower Triassic

Как показало изучение кернового материала, углы падения пород на этих участках достигают 50-70°, а иногда и 90°. Более того, внутри самого триасового разреза отмечается дисгармония в складчатости отдельных литокомплексов, предопределенная неоднородностью их пластических свойств. Достоверность большинства замеров не вызывает сомнений, так как напластование подчеркивается текстурными и структурными особенностями триасовых отложений, чередованием в разрезе различных литологических разностей осадочных и вулканогенно-осадочных пород, в том числе слоев, насыщенных макрофауной, залегающих вертикально (например, скважина 10 Тасбулат).

Поперечными и диагональными разрывами тектонические пластины рассечены на отдельные блоки линзовидной формы, которым в перекрывающих отложениях обычно отвечают локальные поднятия или осложняющие их купола. Плоскость этих разрывов близвертикальна, наряду с вертикальной компонентой смещения отмечается и горизонтальная, то есть своей кинематической природе они являются сбросо- и взбросо-сдвигами.

В головных частях пластин триасовые отложения в предъюрское время подверглись интенсивному размыву. С внешней стороны через высокоамплитудные надвиги и взбросы, подсеченные в ряде случаев скважинами (рис. 3), дислоцированные породы граничат с блоками, в пределах которых одновозрастные отложения имеют полого-волнистое или моноклинальное залегание. При этом наблюдается скачкообразное возрастание стратиграфической полноты триасового разреза. В тыловых частях пластин отложения также залегают спокойно, образуя субпараллельные синклинали с более крутыми южными крыльями (см. рис. 2).

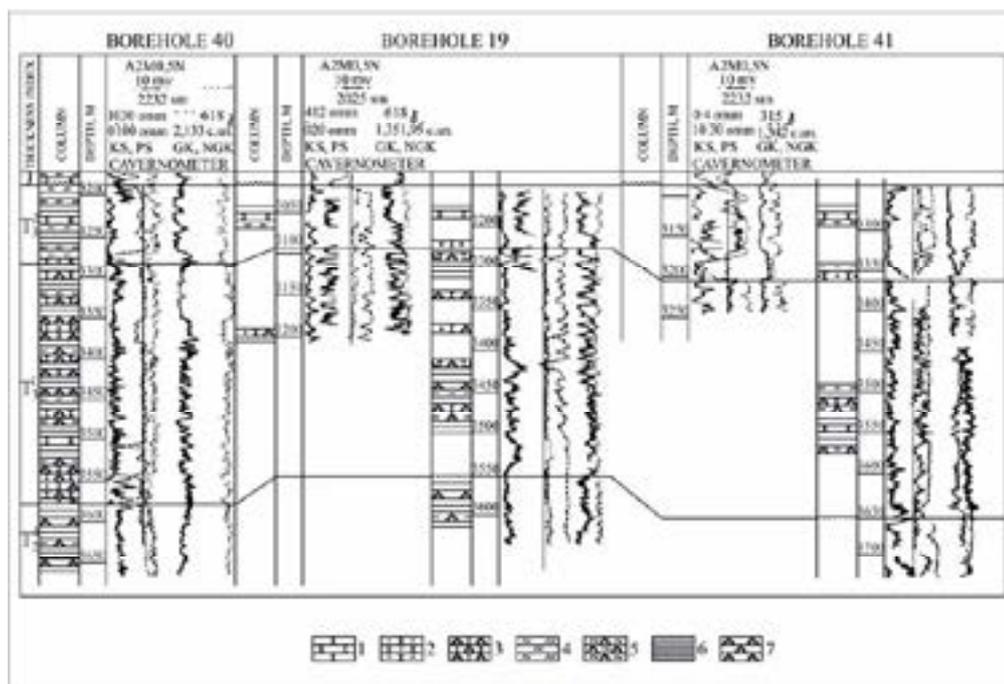


Рис. 3. Схема корреляции триасовых разрезов Южного Жетыбая, иллюстрирующая тектоническое «сдваивание» вулканогенно-терригенной толщи в скважинах 19 и 41.

Условные обозначения см. на рисунке 7 /

Fig. 3. Correlation diagram of the Triassic sections of the Southern Zhetysai, illustrating the tectonic "doubling" of the volcanogenic-terrigenous strata in wells 19 and 41.

See the symbols in Fig. 7

В пределах западных окончаний рассматриваемых тектонических пластин интенсивность деформаций триасовых отложений ослабевает, амплитуда и верхний стратиграфический диапазон проникновения надвигов уменьшаются. Примером могут служить Северо-Западно-Жетыбайское и Южно-Жетыбайское поднятия, представляющие собой резко асимметричные антиклинали, своды которых смещаются с глубиной по направлению к ограничивающим их разрывам. Плоскости надвигов пересечены скважинами 19 и 41 площади Южный Жетыбай, вскрывшими сдвоенные разрезы верхнего триаса.

Описанные выше структурные особенности триасовых отложений указывают на то, что в предъюрское время они испытали на себе мощное воздействие сил горизонтального сжатия, приведшего к сокращению занимаемой ими площади и, как следствие, образованию пологих срывов и тектонических пластин. Трансформация горизонтальных движений в вертикальные сопровождалась складчатостью и разрывом накопленных ранее отложений в их головных частях.

Если амплитуда вертикальных перемещений по взбросо-надвигам устанавливается достаточно надежно, то строгую количественную оценку горизонтальным смещениям пока дать невозможно. Однако их существование подтверждается и другими методами, в частности корреляцией разрезов, вскрытых на незначительном удалении друг от друга и отличающихся не только полнотой и мощностью, но и, самое главное, набором слагающих их фаций. Показательными в этом отношении являются результаты бурения на Западно-Жетыбайской площади, где происходит сочленение двух тектонических чешуй, входящих в Жетыбайскую пластину (рис. 4).

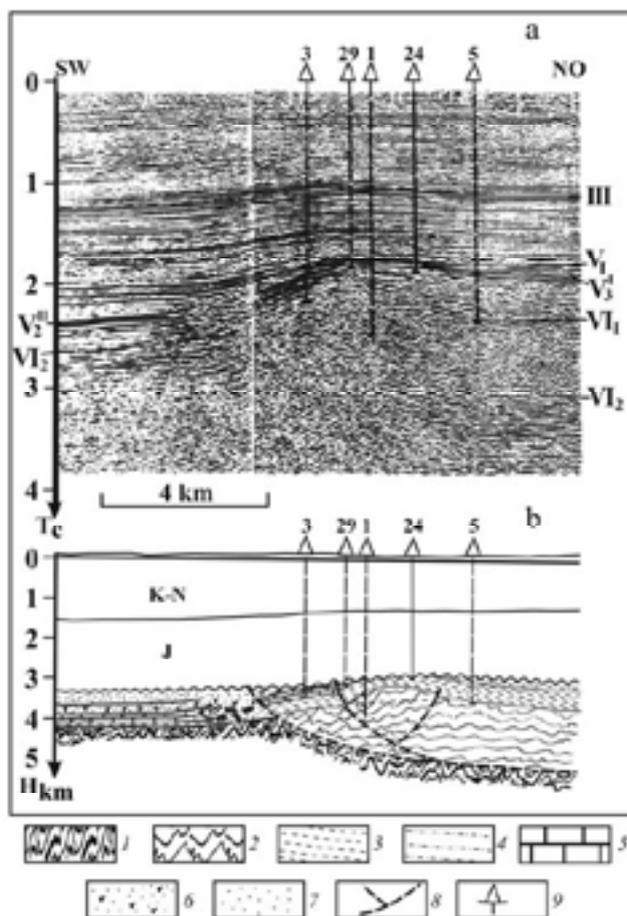


Рис. 4. Разрезы через Западно-Жетыбайскую антиклиналь.

- a* – временной сейсмический разрез,
b – его геологическая интерпретация (на рисунке *b* соотношение вертикального и горизонтального масштабов 1:1).
 Отражающие горизонты: III – подошва неокома, V_1 – подошва юры, V_2^{II} – кровля карбонатного комплекса среднего триаса, V_2^{IV} – подошва карбонатного комплекса среднего триаса, V_3^I – подошва верхнего оленека, V_1 – подошва нижнего триаса, V_2 – кровля каменноугольных (?) образований.
 1 – метаморфические породы фундамента, 2 – слабо метаморфизованные отложения верхнего палеозоя, 3 – алевролитовая пестроцветная толща нижнего триаса, 4 – карбонатно-терригенная толща верхнего оленека, 5 – вулканогенно-карбонатная толща среднего триаса, 6 – туфогенно-терригенная толща верхнего триаса, 7 – песчано-аргиллитовая толща верхнего триаса, 8 – разрывы, 9 – скважины /

Fig. 4. Sections through the Western Zhetysbai anticline.

A – temporary seismic section, b – geological interpretation (in Fig. b the ratio of vertical and horizontal scales is 1:1). Reflecting horizons: III – the sole of the Neocomian, V₁ – the sole of the Jurassic, V₂^{II} – the roof of the carbonate complex of the Middle Triassic, V₂^{IV} – the sole of the carbonate complex of the Middle Triassic, V₃^I – in the sole of the upper Olenek, VI₁ – the sole of the lower Triassic, V₁² – the roof of carboniferous (?) formations. 1 – metamorphic basement rocks, 2 – weakly metamorphosed Upper Paleozoic sediments, 3 – siltstone-argillite variegated strata of the Lower Triassic, 4 – carbonate-terrigenous strata of the upper Olenek, 5 – volcanogenic-carbonate strata of the Middle Triassic, 6 – tufogenic-terrigenous strata of the Upper Triassic, 7 – sandy-mudstone strata of the Upper Triassic, 8 – ruptures, 9 – boreholes

Здесь в пределах взброшенного северо-восточного блока в наиболее приподнятой его части (скважины 1, 24, 35 и 69) под трансгрессивно налегающими отложениями нижней юры вскрыта пестроцветная алевролитово-аргиллитовая толща нижнего триаса. В скважине 5 под отложениями юры установлено присутствие в разрезе карбонатно-терригенной толщи верхнеоленека, залегающей на пестроцветной алевролитово-аргиллитовой толще. Отметим, что накопление карбонатно-терригенной толщи происходило в условиях морского бассейна с нормальным солевым режимом, благоприятным для обитания аммоноидей и другой морской фауны. В скважине 29, расположенной в 300 м от взброса, под юрской толщей пройдено 67 м верхнеоленецких отложений (карбонатно-терригенная толща), в которых скважина и была остановлена.

Скважина 3–Западный Жетыбай, расположенная в юго-западном блоке и находящаяся на расстоянии 3,8 км и 1,2 км от скважин 5 и 29, соответственно, вскрыла иной тип разреза: в интервале 2863–2935 м пройдена туфогенно-терригенная толща верхнего триаса, ниже – вулканогенно-карбонатная толща среднего триаса, а с глубины 3400 м и до забоя – пестроцветы нижнего отдела. То есть данной скважиной вскрыт разрез, типичный для Северо-Западно-Жетыбайского блока, где морские сероцветные отложения верхнего оленека отсутствуют повсеместно. Незначительное расстояние между скважинами позволяет предполагать, что вскрытые ими разрезы триаса принадлежат различным структурно-фациальным зонам и оказались сближенными за счет горизонтальных перемещений. Аналогичные примеры можно найти при сопоставлении триасовых разрезов площадей Сакудук – Южный Жетыбай, Баканд–Тасбулат и другие.

С внешней стороны Жетыбайской пластины в разрезе появляются более молодые отложения верхнего триаса (песчаниково-аргиллитовая толща). Здесь же перед фронтом надвига в верхне- и среднетриасовых частях разреза на временных сейсмических разрезах происходит резкое ухудшение записи вплоть до полной потери информации (см. рис. 4). Не исключено, что данная аномалия фиксирует развитие обломков и глыб в триасовом разрезе, представляющих собой фрагменты тектонической мешанины, сгруженной, как скребком, лобовой частью аллохтона. Аналогичную зону потери корреляции триасовых отражающих горизонтов можно наблюдать на всем протяжении вдоль Тенге-Тасбулатской тектонической пластины.

Таким образом, имеющийся сегодня фактический материал позволяет говорить о том, что в триасовом разрезе Жетыбай-Узеньской ступени главенствующая роль принадлежит серии тектонических чешуй и пластин, в головных частях которых триасовые отложения интенсивно смяты. Очевидно, что Жетыбай-Узеньская сту-

пень по общему стилю тектоники триасового комплекса (линзовидная форма блоков, конформность их укладки и трансляционный характер перемещения данных блоков) может быть определена как многопорядковая складчато-чешуйчатая зона, представляющая собой крупный тектонический срыв, блоком-упором для которого послужил Южно-Мангышлакский геоблок. Последний испытал на себе воздействие тангенциального стресса, направленного со стороны надвигающихся с севера пластин, что привело к образованию в пограничной части Жазгурлинской депрессии Саукудук-Ушкуюнской антиклинальной зоны, а южнее – узкого линейного Тайбагарского желобообразного прогиба.

Саукудук-Ушкуюнская антиклинальная зона, в отличие от антиклинальных зон Жетыбай-Узеньской ступени, не находит отражения в платформенном чехле, в то время как в триасовых отложениях сейсмическими исследованиями здесь закартированы такие высокоамплитудные поднятия, такие как Западный Саукудук, Саукудук, Баканд, Западный Чукур, Чукур, Патлак, Северный Патлак, Пионерское. В целом зона характеризуется высокой плотностью разрывных нарушений и имеет сложное строение.

Наиболее изученной бурением является Пионерская антиклиналь, где, как по данным сейсморазведки, так и глубокого бурения, доказано наличие пологих слоистых срывов в отложениях среднего триаса. На сейсмических разрезах, расположенных вкрест, отчетливо видно тектоническое сдваивание вулканогенно-карбонатного комплекса среднего триаса, с которым связана динамически выраженная группа отражающих горизонтов (рис. 5). Подобная же волновая картина зафиксирована и на продольных сейсмических разрезах (рис. 6). Учитывая, что на временных разрезах вертикальный масштаб относительно горизонтального «растянут» более чем в три раза, можно говорить о наличии здесь очень пологого срыва в среднетриасовом комплексе пород.

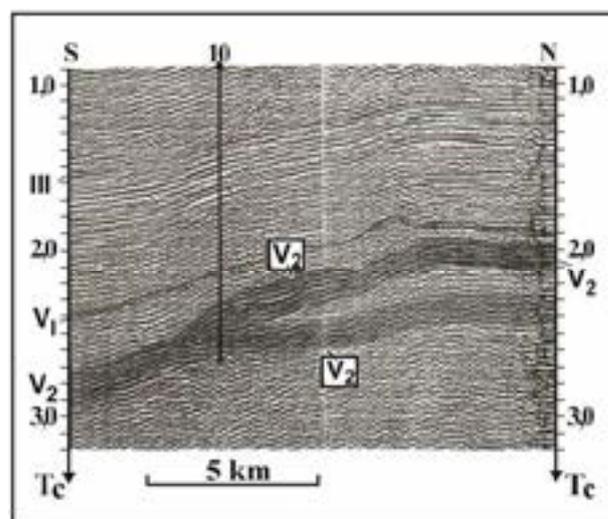


Рис. 5. Поперечный временной сейсмический разрез Пионерской площади.
Отражающие горизонты: III – подошва неокома, IV₁ – подошва оксфорда,
V₂ – внутрисреднего триаса /

Fig. 5. Transverse temporal seismic section of Pionerskaya Square.
Reflecting horizons: III – Neocomian sole, IV₁ – Oxford sole, V₂ – inside the Middle Triassic

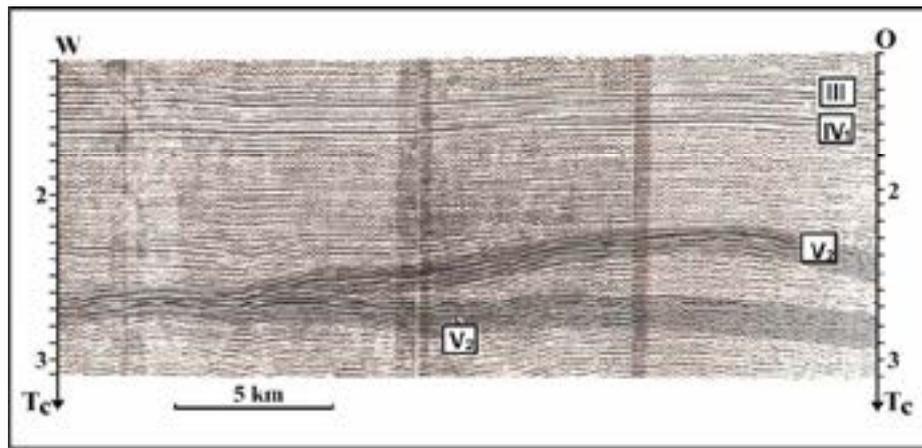


Рис. 6. Продольный временной сейсмический разрез Пионерской площади.
Условные обозначения см. на рисунке 5 /

Fig. 6. Longitudinal temporal seismic section of Pionerskaya Square.
See the symbols in Fig. 5

Тектоническое сдвигание среднетриасового разреза на Пионерской площади подтверждается и материалами глубокого бурения. Так, вулканогенно-доломитовая толща среднего триаса дважды пройдена скважинами 8 и 10 (рис. 7). Отметим, что скважина 10 находится непосредственно на линии сейсмического профиля, приведенного на рисунке 5.

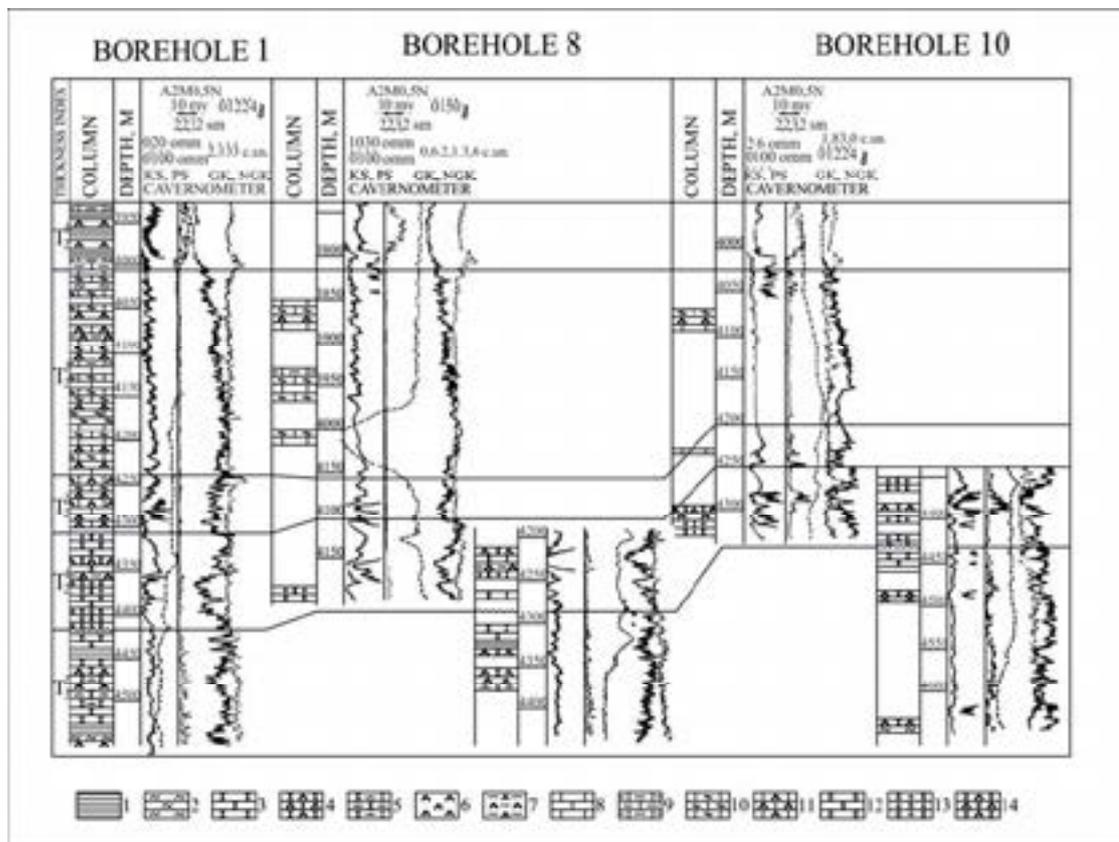


Рис. 7. Схема корреляции триасовых разрезов площади Пионерская, иллюстрирующая тектоническое «сдвигание» вулканогенно-доломитовой толщи среднего триаса в скважинах 8 и 10.

1 – аргиллиты, 2 – алевролиты, песчаники: 3 – аркозовые и полимиктовые, 4 – туфогенные, 5 – известковистые; 6 – туфы, 7 – туфоаргиллиты, известняки: 8 – мелкозернистые и кристаллические, 9 – глинистые, 10 – органогенно-детритовые, 11 – туфогенные; доломиты: 12 – сгустковые, 13 – оолитово-комковатые и оолитово-обломочные, 14 – туфогенные /

Fig. 7. Correlation scheme of Triassic sections of the Pionerskaya area, illustrating the tectonic “doubling” of the volcanogenic-dolomite strata of the Middle Triassic in wells 8 and 10.

1 – mudstones, 2 – siltstones, sandstones: 3 – arkose and polymictic, 4 – tufogenic, 5 – calcareous; 6 – tuffs, 7 – tufoargillites, limestones: 8 – fine-grained and crystalline, 9 – clay, 10 – organogenic-detritus, 11 – tufogenic; dolomites: 12 – clump, 13 – oolitic-lumpy and oolitic-clastic, 14 – tufogenic

Примечательно, что на начальном этапе интерпретации волновой картины на Пионерской площади геофизиками было высказано предположение о наличии на площадях Пионерская и Бакандрифогенных построек [Дмитриев и др., 1982], что, как можно видеть, оказалось ошибочным. Кроме того, в триасовом разрезе отсутствуют рифостроящие организмы, да и сама палеогеографическая обстановка осадконакопления в этот период не способствовала их развитию.

Аналогичную природу можно с большой вероятностью предполагать и для других структур Сакудук-Ушкююнской антиклинальной зоны. На их примере можно видеть, что часть чешуйчато-надвиговых дислокаций, образовавшихся в предъюрское время, развивалась на протяжении очень короткого промежутка геологической истории и в дальнейшем не оказывала влияния на формирование структуры платформенного чехла. Другие же надвиговые дислокации Жетыбай-Узеньской ступени оставались мобильными и в последующем, что сопровождалось образованием в их фронтальных частях антиклиналей в перекрывающем мезозойско-кайнозойском чехле.

Выводы

Учитывая материалы, полученные нами ранее для других районов Скифско-Туранской платформы [Исмагилов и др., 1991], можно говорить о важной, часто недооцененной роли тангенциального стресса в формировании внутренней структуры триасовой части разреза. Деформации бокового сжатия распространены преимущественно в пределах раннекиммерийских складчатых зон – Центрально-Мангышлакской (куда входит и Жетыбай-Узеньская ступень) и Центрально-Азовской – Каневско-Березанской системах дислокаций запада Скифской плиты. Вне этих зон важное значение приобретают сдвиги.

Установленные особенности строения складчато-надвиговых дислокаций могут быть использованы при выборе оптимальной методики полевых сейсмических работ, а также последующей камеральной обработке полученных материалов. Следует также учитывать, что в зонах развития терригенного разреза мощный тангенциальный стресс приводит не только к повышенной деформированности пород во фронтальных частях чешуй, но и к их уплотнению, снижению емкостных свойств, что уменьшает шансы открытия залежей нефти и газа. Другая ситуация наблюдается в случае карбонатного разреза. Здесь за счет повышенной трещиноватости, развития процессов выщелачивания заметно улучшаются емкостно-фильтрационные свойства пород [Попков, 1990]. Наглядным примером могут служить Тасбулатское и Южно-Жетыбайское месторождения.

Присутствие надвиговых дислокаций и пологих срывов в триасовом разрезе Скифско-Туранской платформы позволяет выдвинуть новое, пока еще нетрадиционное направление геологоразведочных работ – поиски залежей нефти и газа в поднадвиговых зонах.

Литература

1. Гиоргобиани Т.В. Условия формирования альпийской складчатой системы Большого Кавказа и характерные особенности ее структуры. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2019. – Т. 9. №1. – С. 43–57. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26787
2. Гиоргобиани Т. В. Этапы, механизмы и геодинамика формирования складчатой системы Большого Кавказа. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2020. – Т. 10. №1. – С. 35–42. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59063
3. Дмитриев Л.П., Козмодемьянский В.В., Хафизов И.А., Корсун П.Е., Панков В.А. Основные результаты и направления геолого-геофизических работ на одиннадцатую пятилетку по поискам неантиклинальных ловушек на Мангышлаке. // *Геология нефти и газа*. – 1982. – №10. – С. 27–32.
4. Исмагилов Д.Ф., Попков В.И., Терехов А.А., Шайнуров Р.В. Аллохтонные структуры Азовского моря. // *Доклады АН СССР*. – 1991. – Т. 321. №4. – С. 792–795.
5. Казанцева Т.Т. О шарьяжно-надвиговой теории и ее творцах. // *Вопросы истории естествознания и техники*. – 2020. – Т. 41. №1. – С. 209–215. DOI: 10.31857/S020596060008416-9
6. Камалетдинов М.А., Казанцев Ю.В., Казанцева Т.Т. Происхождение складчатости. – М.: Наука, 1981. – 135 с.
7. Попков В.И. Тангенциальная тектоника и нефтегазоносность Арало-Каспийского региона. // *Доклады. АН СССР*. – 1990. – Т. 313. №2. – С. 420–423.
8. Харченко В.М., Черненко К.И., Еремина Н.В., Самусев Д.Д. Некоторые закономерности формирования и распространения рифогенных построек в триасовых отложениях на территории Восточного Предкавказья в связи с нефтегазоносностью. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2022. – Т. 12. №3. – С. 133–145. DOI: 10.46698/VNC.2022.80.35.009
9. Хасанов М.А., Эзирбаев Т.Б., Эльжаев А.С. Пространственное распространение пермо-триасовых отложений Восточного Предкавказья и их нефтегазоносность. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2020. – Т. 10. №2. – С. 113–126. DOI: 10.46698/VNC.2020.17.62.008
10. Borderie S., Vendeville B.C., Graveleau F., Witt C., Dubois P., Baby P., Calderon Y. Analogue modeling of large-transport thrust faults in evaporitesfloored basins: Example of the Chazuta Thrust in the Huallaga Basin, Peru. // *Journal of Structural Geology*. – 2019. – Vol. 123. – pp. 1–17.
11. Carola E., Muñoz J.A., Roca E. The transition from thick-skinned to thin-skinned tectonics in the Basque-Cantabrian Pyrenees: the Burgalesa Platform and surroundings. // *Int. J. Earth Sci. (Geol.Rundsch.)*. – 2015. – pp. 56–73. DOI: 10.1007/s00531-015-1177-z EDN: VGCXXT
12. Jourdon A., Mouthereau F., Le Pourhiet L., Callot J.-P. Topographic and tectonic evolution of mountain belts controlled by salt thickness and rift architecture. // *Tectonics*. – 2020. – Vol. 39. – pp. 45–57. DOI: 10.1029/2019TC005903 EDN: XEUTPL
13. Li S., Wang X., Suppe J. Compressional salt tectonics and syn-kinematic strata of the western Kuqaforeland basin, Southern Tian Shan, China. // *Basin Research*. – 2012. – No.24. – pp. 475–497. DOI: 10.1111/j.1365-2117.2011.00531.x
14. Nelepov M., Gridin R., Lutsenko O., Sterlenko Z., Tumanova Ye., Yeriomina N., Chernenko K., Gridin V. Fracture modeling of carbonate reservoirs of Low Triassic Neftekumsk 144 formation of hydrocarbon field in Petrel software. // *E3S Web of Conferences*. – 2021. – Vol. 24. – pp. 23–32. DOI: 10.1051/e3 sconf/202124403020
15. Popkov V.I. Intraplate structures of lateral compression. // *Geotektoniks*. – 1991. – No.2. – pp. 13–27.
16. Roeder D. Fold-thrust belts at Peak Oil. // *Hydrocarbons in contractual belts*. Geological Society. – London. – 2010. – Vol. 348. – pp. 7–31. DOI: 10.1144/sp348.2
17. Sobornov K.O. Lateral variations in structural styles of tectonic wedging in the Northeastern Caucasus, Russia. // *Bull. Can. Petrol. Geol.* – 1996. – Vol. 44(2). – pp. 385–399. EDN: LDWHFV
18. Sobornov K.O. Structure and development of wedged thrusts in the southern flank of the Terek-Caspian Foredeep, Russia. – 2020. – Search and Discovery Article #30654.

19. Yu Y., Tang L., Yang W., Huang T., Qiu N., Li W. Salt structures and hydrocarbon accumulations in the Tarim Basin, northwest China. // *AAPG Bulletin*. – 2014. – Vol. 98. No.1. – pp. 135–159. EDN: SQOPJR
20. Xu S. A major gas field in the Tarim Basin of west China. // *Petroleum Geoscience*. – Vol. 10. – 2004. – pp. 95–106. DOI: 10.1144/1354-079303-571.
21. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Mel'kov D.A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of northern Caucasus. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014a. – Vol. 50(2). – pp. 263–272.
22. Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014b. – Vol. 50(5). – pp. 707–718.
23. Zaalishvili V., Mel'kov D., Kanukov A., Dzeranov B. Spectral-temporal features of seismic loadings on the basis of strong motion wavelet database. // *International Journal of GEOMATE*. – 2016. – Vol. 10(1). – pp. 1656–1661.

References

1. Giorgobiani T.V. Conditions for the formation of the Alpine folded system of the Greater Caucasus and characteristic features of its structure. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2019. Vol. 9. No. 1. pp. 43–57. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26787
2. Giorgobiani T.V. Stages, mechanisms and geodynamics of the formation of the folded system of the Greater Caucasus. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2020. Vol. 10. No. 1. pp. 35–42. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59063 EDN: KMNYKJ
3. Dmitriev L.P., Kozmodemyansky V.V., Khafizov I.A., Korsun P.E., Pankov V.A. Main results and directions of geological and geophysical work for the eleventh five-year plan to search for non-anticlinal traps in Mangyshlak. *Geology of oil and gas*. 1982. No. 10. pp. 27–32. (In Russ.)
4. Ismagilov D.F., Popkov V.I., Terekhov A.A., Shainurov R.V. Allochthonous structures of the Sea of Azov. *Doklady. Academy of Sciences of the USSR*. 1991. Vol. 321. No. 4. pp. 792–795. (In Russ.)
5. Kazantseva T.T. On the overthrust-folding theory and its creators. *Issues of the history of natural science and technology*. 2020. Vol. 41. No. 1. pp. 209–215. DOI: 10.31857/S020596060008416-9. (In Russ.)
6. Kamaletdinov M.A., Kazantsev Yu.V., Kazantseva T.T. The origin of folding. Moscow. Nauka. 1981. 135 p. (In Russ.)
7. Popkov V.I. Tangential tectonics and oil and gas potential of the Aral-Caspian region. *Doklady. Academy of Sciences of the USSR*. 1990. Vol. 313. No. 2. pp. 420–423. (In Russ.)
8. Kharchenko V.M., Chernenko K.I., Eremina N.V., Samusev D.D. Some patterns of formation and distribution of reef structures in the Triassic deposits in the territory of the Eastern Ciscaucasia in connection with the oil and gas potential. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2022. Vol. 12. No. 3. pp. 133–145. DOI: 10.46698/VNC.2022.80.35.009
9. Khasanov M.A., Ezirbaev T.B., Elzhaev A.S. Spatial distribution of Permian-Triassic deposits of the Eastern Ciscaucasia and their oil and gas potential. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2020. Vol. 10. No. 2. pp. 113–126. DOI: 10.46698/VNC.2020.17.62.008
10. Borderie S., Vendeville B.C., Graveleau F., Witt C., Dubois P., Baby P., Calderon Y. Analogue modeling of large-transport thrust faults in evaporites-floored basins: Example of the Chazuta Thrust in the Huallaga Basin, Peru. *Journal of Structural Geology*. 2019. Vol. 123. pp. 1–17.
11. Carola E., Muñoz J.A., Roca E. The transition from thick-skinned to thin-skinned tectonics in the Basque-Cantabrian Pyrenees: the Burgalesa Platform and surroundings. *International Journal of Earth Sciences (Geol.Rundsch.)*. 2015. pp. 56–73. DOI: 10.1007/s00531-015-1177-z EDN: VGCXXT.

12. Jourdon A., Mouthereau F., Le Pourhiet L., Callot J.-P. Topographic and tectonic evolution of mountain belts controlled by salt thickness and rift architecture. *Tectonics*. 2020. Vol. 39. pp. 45–57. DOI: 10.1029/2019TC005903 EDN: XEUTPL.
13. Li S., Wang X., Suppe J. Compressional salt tectonics and syn-kinematic strata of the western Kuqaforeland basin, Southern Tian Shan, China. *Basin Research*. 2012. No.24. pp. 475–497. DOI: 10.1111/j.1365-2117.2011.00531.x.
14. Neleпов M., Gridin R., Lutsenko O., Sterlenko Z., Tumanova Ye., Yeriomina N., Chernenko K., Gridin V. Fracture modeling of carbonate reservoirs of Low Triassic Neftekumsk 144 formation of hydrocarbon field in Petrel software. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 24. pp. 23–32. DOI: 10.1051/e3sconf/202124403020.
15. Popkov V.I. Intraplate structures of lateral compression. *Geotektoniks*. 1991. No.2. pp. 13–27.
16. Roeder D. Fold-thrust belts at Peak Oil. *Hydrocarbons in contractual belts*. Geological Society. London. 2010. Vol. 348. pp. 7–31. DOI: 10.1144/sp348.2.
17. Sobornov K.O. Lateral variations in structural styles of tectonic wedging in the Northeastern Caucasus, Russia. *Bull. Can. Petrol. Geol.* 1996. Vol. 44. Issue 2. pp. 385–399. EDN: LDWHFV
18. Sobornov K.O. Structure and development of wedged shaped thrusts in the southern flank of the Terek-Caspian Foredeep, Russia. 2020. *Search and Discovery Article #30654*.
19. Yu Y., Tang L., Yang W., Huang T., Qiu N., Li W. Salt structures and hydrocarbon accumulations in the Tarim Basin, northwest China. *AAPG Bulletin*. 2014. Vol. 98. No.1. pp. 135–159. EDN: SQOPJR
20. Xu S. A major gas field in the Tarim Basin of west China. *Petroleum Geoscience*. Vol. 10. 2004. pp. 95–106. DOI: 10.1144/1354-079303-571.
21. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Mel'kov D.A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of northern Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014a. Vol. 50(2). pp. 263–272.
22. Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014b. Vol. 50(5). pp. 707–718.
23. Zaalishvili V., Mel'kov D., Kanukov A., Dzeranov B. Spectral-temporal features of seismic loadings on the basis of strong motion wavelet database. *International Journal of GEOMATE*. 2016. Vol. 10(1). pp. 1656–1661.

ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК 551.24

DOI: [10.46698/VNC.2023.74.77.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.74.77.004)

Оригинальная статья

Геоморфологическое, геолого-тектоническое строение, геодинамические и экологические условия горы Машук и примыкающей территории центральной части района Кавказских Минеральных Вод

А.А. Стасенко , М.Н. Данилин , В.М. Харченко , А.Е. Неркарян 

Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355009, г. Ставрополь,
пр-т Кулакова, 16/1, корп. 16, e-mail: stasenko.alexandr.2016@gmail.com

Статья поступила: 01.02.2023, доработана: 28.02.2023, одобрена в печать: 05.03.2023

Резюме: Актуальность работы. Гора Машук не только занимает географически центральное место на территории Кавказских Минеральных Вод (КМВ) среди многочисленных магматических диапиров и криптолакколитов, но и является одним из важнейших объектов туризма, а также уникальным объектом для изучения геолого-тектонических и геодинамических условий, особенно в плане сейсмичности и экологической безопасности территории. **Цель работы** – комплексное изучение горы Машук для обеспечения сейсмической и экологической безопасности, а также устойчивого социально-экономического развития региона КМВ. **Методы исследований.** На первом этапе научных исследований проведён анализ многочисленного материала по геоморфологии и геологическому строению, в том числе по данным сейсмологических исследований территории г. Машук и прилегающих территорий. Подготовлены материалы по топографической съёмке и космические снимки различных масштабов (крупного и среднего), разработана теоретическая база и методология научных исследований. Теоретическая база основывалась на традиционных и нетрадиционных представлениях (ротационной концепции тектогенеза, её следствии – плюмтектонике, рингтектонике и блоктектонике, структурах растяжения, концепции природы структур центрального типа). Из традиционных представлений использовались учение о современных и древних фациях, природно-территориальных комплексах (ПТК) и ландшафтоведение. Методология научных исследований, в том числе основана на традиционных и нетрадиционных методах. Из традиционных методов использовался известный системно-аэрокосмический метод групповой геологической съёмки, метод ключевых участков, структурно-геоморфологический метод. Из нетрадиционных: новый метод ландшафтно-геоэкологического картирования, структурно-метрический метод и метод интерпретации СЦТ или метод рудонефтегазогеологического и сейсмического районирования. **Результаты работы.** В результате изучения материалов предшественников по геоморфологии, геологии и тектонике, дешифрирования космических снимков различных масштабов и топокарт проанализированы составленные авторами карты: ландшафтно-геоэкологических условий, схема рудонефтегазогеологического и сейсмического районирования, схемы геодинамических условий. На их основе сделан прогноз экологических условий (затопления, подтопления); выделены участки сейсмических рисков (возможных эпицентров катастрофических землетрясений). Выявлены основные особенности геоморфологического, геолого-тектонического строения и геодинамических условий горы Машук и прилегающих территорий. Впервые выданы рекомендации по предупреждению катастрофических землетрясений путем бурения скважин на термальные и минеральные источники в суперрезонансных зонах.

Ключевые слова: криптолакколит, магматический диапир, структуры центрального типа, геодинамические центры, зоны сжатия и растяжения, суперрезонансные зоны, очаги землетрясений, комплексный мониторинг.

Для цитирования: Стасенко А.А., Данилин М.Н., Харченко В.М., Неркарарян А.Е. Геоморфологическое, геолого-тектоническое строение, геодинамические и экологические условия горы Машук и примыкающей территории центральной части района Кавказских Минеральных Вод. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(1): 47-58. DOI: 10.46698/VNC.2023.74.77.004.

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

DOI: [10.46698/VNC.2023.74.77.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.74.77.004)

Original paper

Geomorphological, geological and tectonic
structure, geodynamic and ecological conditions of
Mount Mashuk and the adjacent territory
of the central part of the Caucasus
Mineralnye Vody region

A.A. Stasenko , M.N. Danilin , V.M. Kharchenko , A.E. Nerkararian 

North-Caucasus Federal University, 16/1 Kulakova Avenue, Stavropol
355009, Russian Federation, e-mail: stasenko.alexandr.2016@gmail.com

Received: 01.02.2023, revised: 28.02.2023, accepted: 05.03.2023

Abstract: Relevance. Mount Mashuk occupies a geographically central place not only on the territory of the Caucasian Mineral Waters (CMW) among numerous igneous diapirs and cryptolaccoliths, it is one of the most important tourism objects, but also a unique object for studying geological, tectonic and geodynamic conditions, especially in terms of seismicity and environmental safety territory. **The aim of the study** is a comprehensive study of Mount Mashuk to ensure seismic and environmental safety, as well as sustainable socio-economic development of the CMW region. **Methods.** At the first stage of scientific research, an analysis of numerous material on geomorphology and geological structure was carried out, including data from seismological studies of the territory of the city of Mashuk and adjacent territories. Materials on topographic surveys and satellite images of various scales (large and medium) have been prepared, a theoretical base and methodology for scientific research have been developed. The theoretical basis was based on traditional and non-traditional concepts (the rotational concept of tectogenesis, its corollary – plume tectonics, ring tectonics and block tectonics, extension structures, the concept of the nature of structures of the central type). From traditional ideas, the doctrine of modern and ancient facies, natural-territorial complexes (NTC) and landscape science were used. The methodology of scientific research is also based on traditional and non-traditional methods. Of the traditional methods, the well-known system-aerospace method of group geological survey, the method of key areas, and the structural-geomorphological method were used. Of the non-traditional ones: a new method of landscape-geoecological mapping, a structural-metric method and a method of interpreting the SCT, or a method of ore-gas-geological and seismic zoning. **Results.** As a result of studying the materials of predecessors in geomorphology, geology and tectonics, deciphering satellite images of various scales and topographic maps, maps compiled by the authors were analyzed: landscape and geoecological conditions, a scheme of ore, gas, geological and seismic zoning, schemes of geodynamic conditions. Based on them, a forecast of environmental conditions (flooding, flooding) was made; areas of seismic risks (possible epicenters of catastrophic earthquakes) are identified.

The main features of the geomorphological, geological-tectonic structure and geodynamic conditions of Mount Mashuk and adjacent territories are revealed. For the first time, recommendations were issued on the prevention of catastrophic earthquakes by drilling wells for thermal and mineral springs in superresonant zones.

Keywords: cryptolaccolith, igneous diapirs, central-type structures, geodynamic centers, compression and extension zones, superresonant zones, earthquake sources, integrated monitoring.

For citation: Stasenko A.A., Danilin M.N., Kharchenko V.M., Nerkararian A.E. Geomorphological, geological and tectonic structure, geodynamic and ecological conditions of Mount Mashuk and the adjacent territory of the central part of the Caucasus Mineralnye Vody region. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(1): 47-58. DOI: 10.46698/VNC.2023.74.77.004.

Введение

В последние годы во многих областях наук о Земле основным информационным ресурсом являются результаты инструментальных наблюдений. Это в полной мере относится к задачам геологии [Zaalishvili et al., 2014a, b; 2016].

Объектом исследования является, прежде всего, гора Машук, расположенная на территории Кавказских Минеральных Вод (КМВ). В работе впервые предлагается комплексный подход к изучению данного объекта, как с позиции традиционных методов, так и нетрадиционных (с позиции структур центрального типа (СЦТ)), с целью получения новых теоретических данных и совершенствования методологии научных исследований, на основе которых будут показаны особенности геоморфологического, геолого-тектонического строения, геодинамических и экологических условий исследуемой территории. Также в работе будут даны рекомендации по бурению скважин на термальные и минеральные воды.

Для достижения поставленной цели, в ходе исследования предлагается произвести решение следующих задач: изучить геоморфологические, геодинамические и экологические особенности района работ; провести ландшафтно-геоэкологическое районирование; произвести анализ сейсмологических данных и результатов интерпретации СЦТ; выполнить рудонефтегазогеологическое и сейсмическое районирование в пределах территории исследования.

Материалы и методы исследований

В качестве основных информационных источников использованы данные сейсморазведки, космоснимки различных масштабов, сейсмогеологические профили, структурные карты, а также многочисленные публикации по исследуемой проблеме.

В процессе исследования применялись анализ, систематизация и обобщение геологической, геофизической информации и данных по геоморфологии изучаемой территории, системно-аэрокосмический метод, включающий как классическую технологию дешифрирования и интерпретации космических снимков, так и выделение объектов на основе интерпретации структур центрального типа (СЦТ).

Результаты работы и их обсуждение

Вопросами изучения геоморфологии и тектоники занимался ряд исследователей. Основателями геоморфологии считаются немецкий геоморфолог Вальтер Пенк и американский геоморфолог Уильям Моррис Дэвис. Большой вклад в её развитие внёс основатель кафедры геоморфологии на географическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова профессор Иван Семенович Щукин. Конкретно под тектонической геоморфологией понимают одну из самых молодых отраслей геоморфологии, помогающую объединить обширные разделы геоморфологии и тектоники

[Летавин и др., 1987]. Тектоническая геоморфология имеет несколько основных направлений, в том числе: эволюция ландшафта активных окраин плит; горообразование; развитие систем активных разломов и складок; эволюция пассивных окраин, континентальных внутренних районов и поднятия плато; вулканы геоморфологии и связанные с ними особенности; палеосейсмология и оценка сейсмической опасности [Рогожин и др., 1998]; взаимодействие тектоники, климата, поверхностных процессов и полигенетических ландшафтов, а также предупреждение опасностей. [Lewis, 2022].

Геоморфологическое строение. Гора Машук высотой 993 м расположена в центральной части района Кавказских Минеральных Вод и является одной из 17 горлаколитов (названия остальных: Бештау, Железная, Развалка, Змейка, Лысая, Кинжал, Кокуртлы, Верблюд, Бык, Медовая, Кабанка (Тупая), Острая, Шелудивая, Золотой Курган, Джуца 1-я (Юца) и Джуца 2-я (Джуца)). От горы Бештау она отделяется хорошо заметной седловиной [Павлинов, 1973].

Мезоформы рельефа представлены, в первую очередь, карстовыми воронками, которые имеют развитие в пределах распространения известковых травертинов в основном северо-восточной, восточной и юго-восточной частей и прилегающих площадей горы Машук. Размер их достигает нескольких метров в диаметре, а глубина не более 3-х метров. Распределение их по площади весьма неравномерно, чаще приурочиваются к зонам трещиноватости горных пород, особенно к узлам пересечения разнонаправленных трещин. Известный «Провал» ошибочно многие исследователи относят к категории карстовых образований, что в принципе противоречит известному процессу карстообразования как процессу растворения карбонатов под воздействием именно пресных вод. Как известно, в «Провале» по тектоническому нарушению идет восходящая миграция высокоминерализованных термальных вод к поверхности с образованием травертинов карбонат-сульфатного состава. Растворение вмещающих карбонат-глинистых пород здесь маловероятно. В следующем разделе этой работы будет показан механизм образования «Провала» с тектонических позиций [Гзовский, 1975; Гниловской, 1949].

Из мезоформ рельефа особое место занимают, так называемые, гроты в скальных выходах горных пород как осадочного, так и магматического происхождения. Они имеют довольно редкое распространение, тем не менее являются особой достопримечательностью не только на горе Машук, но и в других местах КМВ. Это, в первую очередь, грот вечной мерзлоты на горе Развалка, грот Древнего Человека в пределах Селитровых скал на северо-восточном склоне горы Развалка, грот под северо-восточной частью вершины Большой Тау и многочисленные мелкие гроты и даже выемки в трахилипаритах и липаритах, слагающих горы Козьи Скалы на восточном склоне горы Бештау. К этой категории можно отнести и известную гору «Кольцо» под городом Кисловодском, так как все они образовались в результате физического выветривания горных пород различного состава и прочности: в магматических породах это своеобразные линзы трахилипаритов среди «чистых» липаритов, а в сравнительно плотных песчаниках наблюдается наличие рыхловатых разностей несколько другого состава. Как известно, под действием процессов физического выветривания рыхлые разности легко разрушаются, выносятся и таким образом образуются ниши или даже «дырки» выветривания в скальных образованиях. Под горой Машук это известные гроты Дианы, Лермонтова. Особо следует сказать о значительном отличии по комфортности грота вечной мерзлоты на горе Развалка, который, в отличие от остальных, представляет собой «естественный холодильник», функционирующий

по принципу искусственного. Здесь по зонам трещиноватости циркулируют флюиды, создавая как дроссельный эффект (формируя экзотермические условия, достаточные для постоянного замораживания воздуха), так и растворяя карбонатные породы. Кстати, под горой Бештау наблюдаются мелкие гроты в зонах тектонических разломов с характерным холодным воздухом на входе в летний период времени. Следует еще отметить, что в гроте Древнего Человека отмечаются более комфортные условия, а также в непосредственной близости находится родниковый источник пресной воды на фоне многочисленных минеральных источников в этой округе.

Геоморфологические особенности заключаются в следующем:

1. В отличие от таких гор, как Бештау, Змейка, гора Машук не имеет выраженного круглого пьедестала, а на южном ее склоне выделяется серия структурно-аккумулятивных террас, сложенных карбонатными травертинами. К зоне тектонического разлома на юго-восточном склоне приурочивается знаменитый «Провал».

2. Со стороны южного склона горы Машук выделяется особый, своеобразный пьедестал из, так называемых, травертиновых структурно-аккумулятивных террас высотой от нескольких до первых десятков метров. Они осложнены мезоформами рельефа – карстовыми воронками незначительной глубины (0–5 м) и диаметром в несколько метров.

3. Основной, уникальной особенностью на юго-восточном склоне является, так называемый, «Провал», который представляет собой наглядный пример структуры растяжения и является, по существу, сейсмодислокацией – следом катастрофического землетрясения.

Можно подытожить, что гора Машук имеет достаточно сложное геологическое строение, которое является результатом длительного формирования рельефа, обусловившего его разнообразие и уникальность.

Геолого-тектоническое строение. Вопросами геолого-тектонического строения в районе присутствия лакколлитов занимался ряд ученых. Так, в одной из работ [Ryan et al., 2017] исследуется эволюция лакколита в плане и доказывается, что окончательная форма лакколита является результатом конкуренции между внутренними магматическими явлениями (например, избыточным давлением и процессом затвердевания) и состоянием внешних вмещающих пород (например, их мощностью, наличием разломов и региональных тектонических напряжений). Морфологию интрузии можно использовать в качестве логического инструмента для лучшего понимания динамики и истории внедрения.

Трещинный перенос магмы через неглубокую кору приводит к образованию магматических подводящих систем, которые представляют собой сложные взаимосвязанные сети (Thomson, 2004, Cartwright, Hansen, 2006, Magee et al., 2013, McLean et al., 2016). Отклонения и обходные пути магмы на ее пути от источника к поверхности происходят, когда магма сталкивается со значительными неоднородностями земной коры, такими как разности литологии, вариации поля напряжений и наличие ранее существовавших разломов и складок; все они могут изменять направление вертикального переноса магмы на субгоризонтальное (Hyndman, Alt, 1987, Hogan et al., 1998, Burchardt, 2008, Menand et al., 2010, Gudmundsson, 2011, Holt et al., 2014).

Машук – криптолакколит (куполовидная структура), возвышающаяся на 400 м над окружающей местностью. Ранее авторами, подробно были описаны геоморфологические особенности горы Машук (сборник материалов конференции «Актуальные проблемы наук о Земле», апрель, 2022 г).

Для геологического картографирования отдельных территорий широко исполь-

зуются технологии дистанционного зондирования и геоинформационных систем (ГИС) [Корчуганова, 2009]. На примере Ферганской впадины [Umurzakov, Rabbimkulov, 2022] с помощью материалов дистанционного зондирования (конкретно спутниковые снимки Landsat-8) для картирования структурных и геоморфологических элементов были выделены зоны разломов, линеаменты различного ранга, различные поднятия, впадины и разновозрастные структурно-вещественные комплексы [Милосердова и др., 2021]. На основе углубленного анализа геолого-геофизических данных разработана геологическая карта-схема Ферганской впадины. С использованием геологического ландшафта и автоматизированных методов дешифрирования космических снимков выделены основные неотектонические элементы Ферганской впадины: южная ступень, северный краевой склон, центральная грабен-синклиналь, флексуно-разломные зоны, локальные антиклинальные зоны, отдельные поднятия/впадины и локальные зоны сдвига. По результатам составлена неотектоническая карта района исследований, которая может быть использована в качестве тектонической основы для поисково-разведочных работ, картирования сейсмического районирования и инженерно-геологических разработок.

В работе [Gaidzik, 2021] также выделяются сейсмолинеаменты для изучения потенциально активных структур на доминирующей плите над зоной субдукции Наска в южных перуанских Андах. Результаты данного исследования подчеркивают полезность метода сейсмолинеаментного анализа в качестве инструмента для распознавания областей, подверженных потенциальным сейсмогенным разломам, которые следует изучить более подробно с использованием палеосейсмологических, геоморфологических, геодезических и геофизических методов. Они также показывают важность разломов земной коры в общей оценке сейсмической опасности [Jie et al., 2022; Volpe et al., 2022].

В районе горы Машук особо выделяются нарушения северо-восточного простирания, представленные зонами дробления с кальцитовыми жилами [Винник и др. 2021]. По результатам дешифрирования космических снимков в принципе подтверждаются вышеописанные тектонические нарушения, которые выделяются в форме линеаментов различной протяженности и образуют на исследуемой территории систему различных блоков. Особое значение имеет выделение СЦТ различного ранга, позволяющее, в результате их интерпретации, проводить рудонефтегазогеологическое и сейсмическое районирование..

В работе [Стогний и др., 2022] доказываются возможности комплексного анализа мониторинга современных геодинамических процессов и сейсмичности с помощью существующей сети станций и лабораторий Северного Кавказа. Этот анализ используется для оценки состояния геодинамического развития региона как основы при разработке методики оценки геоэкологических рисков. Авторы используют материалы GPS-наблюдений со схемой блокового строения кристаллического фундамента Большого Кавказа, составленной по данным интерпретации гравитационного и магнитного полей. Итогом данного анализа является выявление закономерной связи между направлениями векторов скорости перемещения GPS-пунктов в пределах проекций этих блоков. По нашему мнению, данный метод мониторинга современных геодинамических процессов и сейсмичности можно совместить для получения более точных результатов с методом ландшафтно-геоэкологического картирования, структурно-метрическим методом и методом интерпретации СЦТ (рудонефтегазогеологического и сейсмического районирования) с выделением суперрезонансных зон и геодинамических центров. Совмещение вышеперечисленных методов помо-

жет решить задачу поиска взаимосвязи между глубинными источниками тектонических напряжений и их возможной связи с приповерхностной геодинамикой и сейсмическим режимом, которые могли бы стать основой наиболее полного и детального геоэкологического районирования [Хаин, 1995, 2007].

Геодинамические и экологические условия. На южном склоне горы Машук были установлены четко прослеживающиеся на поверхности в меловых и палеогеновых отложениях два полукольцевых взброса, направленных параллельно друг другу [Герасимов, 1974]. Первый из них – Северный, или Главный, – имеет амплитуду 340–350 м (район озера Провал), а второй – Южный – около 120 м. Помимо этих тектонических элементов локального характера здесь же установлены многочисленные тектонические трещины северо-восточного простирания, располагающиеся параллельно друг другу и носящие региональный характер распространения.

Таким образом, наиболее вероятным путем происхождения горы Машук было поднятие вверх магматического тела (магматического диапира), образующего в целом сводовое поднятие с горизонтальным растяжением вышележащей слоистой толщи осадочных пород. Далее сформировались «провал» кровли и структура типа «грабен», то есть типичная структура растяжения, наглядным примером которой является наиболее примечательный объект на горе Машук – «Провал». Особо следует отметить, что процесс инверсии тектонических движений, как правило, сопровождается катастрофическим землетрясением, а такие структуры естественно являются своеобразными сейсмодислокациями. В других геоморфологических условиях, например, в долинах рек они образуют локальные аномальные расширения пойм, которые часто подпруживают, заполняют водой реки и образуют водохранилища различного размера. На территории КМВ такие водохранилища обустроены в городах Кисловодске и Пятигорске на реке Подкумок.

С этих позиций можно поддержать версию о постепенном во времени выдавливании лакколитов. Данный процесс происходит в том случае, когда осадочные породы под огромным давлением поднимающегося интрузивного тела – а именно вязкой, остывающей магмы – образуют диапир, имеющий форму куполообразной антиклинальной складки, которая впоследствии преобразуется и постепенно разрушается [Соболев, 1959].

Наиболее полно геодинамические условия территории исследования представляются в результате интерпретации СЦТ различного ранга, которые выделяются в результате дешифрирования космических снимков и топографических карт различного масштаба. Составлены карты-схемы рудонефтегазогеологического районирования территории КМВ и, в частности горы Машук и прилегающей территории города Пятигорска, на которых выделяются такие структуры, как зоны сжатия и растяжения, геодинамические центры, участки их наложения (резонансные и суперрезонансные зоны), а также структуры растяжения – своеобразные сейсмодислокации [Харченко и др., 2022]. Для территории КМВ проведен анализ возможных будущих очагов катастрофических землетрясений. Это такие участки на исследуемой территории, где в одном месте сочетаются или совпадают геодинамические центры и резонансные зоны сжатия [Харченко и др., 2018, 2022]. Еще важнее нахождение участков в суперрезонансных зонах (наложение на резонансные зоны растяжения резонансных зон сжатия) [Martínez et al., 2018].

Для снятия тектонических напряжений в суперрезонансных зонах и геодинамических центрах, рекомендуется бурение системы разгрузочных скважин на термальные и минеральные воды, а в отдельных благоприятных условиях (наличия

коллекторов и покрышек), бурение скважин на нефть и газ [Соколов и др., 1999]. Кроме того, в первую очередь, необходимы организация комплексного мониторинга по предвестникам землетрясений и статистический анализ катастрофических землетрясений за последние века и десятилетия для составления циклограмм, при анализе которых возможен краткосрочный прогноз (согласно закону циклов: «ритмы в циклах, циклы ритмичны») [Тяпкин и др., 2007; Pang et al., 2022].

Экологические условия территории исследования (г. Машук) не ограничиваются только сейсмической обстановкой, а существенно дополняются и другими процессами природного и антропогенного характера. Они наиболее объективно могут быть представлены на ландшафтно-геоэкологических картах различного масштаба, методы составления которых разработаны автором этой работы [Харченко и др., 2018]. Примером их является карта ландшафтно-геоэкологических условий территории Республики Калмыкия, составленная в 90-е годы прошлого века, и пока что неопубликованные карты Бештаугорской площади, где ежегодно проводится геолог-съёмочная практика студентов 2 курса кафедры геологии нефти и газа СКФУ.

На этих картах, кроме геологической информации, наносятся наиболее важные элементы ландшафта, в первую очередь гидросеть (постоянные и временные водотоки), по которой определяется не только современная и новейшая геодинамика, но и водосборные площади, пути миграции и площади аккумуляции загрязняющих веществ, которые имеют место на площади водосбора. Особое значение эти карты имеют для подтверждения достоверности выделения линеаментов и СЦТ.

Авторами на основе изучения природно-территориальных комплексов и основ ландшафтоведения составлено ландшафтно-геоэкологическое картирование (ЛГЭК) исследуемого участка КМВ. Для территории Бештаугорской площади составление ЛГЭК чрезвычайно актуально, так как на этой территории разрабатывалось месторождение урана и высока вероятность загрязнения радионуклидами. Вопрос состоит в том, насколько возможно загрязнение радионуклидами прилегающих территорий, в том числе города Пятигорска и горы Машук? При предварительном анализе ЛГЭК города Пятигорска, горы Машук и сопредельной Бештаугорской площади наличие временных и постоянных водотоков, которые бы «соединяли» эти площади практически отсутствует, что позволяет говорить об отсутствии загрязняющих веществ (радионуклидов), которые бы мигрировали по водотокам с Бештаугорской площади. Однако на этом нельзя успокаиваться, т.к. вполне возможна и подземная связь по зонам растяжения, которые выделяются при интерпретации СЦТ. Зоны растяжения пересекают в субмеридиональном направлении Бештаугорскую площадь и площадь города Пятигорска на юге общей территории исследования. Это наглядно показано на составленной ландшафтно-геоэкологической карте и схеме интерпретации СЦТ [Харченко и др., 2018].

В плане сейсмической опасности в городе Пятигорске следует ожидать эпицентр землетрясения, в первую очередь, в районе водохранилища на реке Подкумок, где выделяется геодинамический центр, суперрезонансная зона и структура растяжения (аномальное расширение поймы реки Подкумок). При очередной тектономагматической активизации (предвестником которой будет «пробуждение» супервулкана Эльбрус) очаги катастрофических землетрясений вероятны, опять же, в месте «Провала» и в других геодинамических центрах территории исследования. Кроме сейсмической опасности, на данной территории вероятны и проявления негативных физико-геологических процессов: затопления, подтопления, заболачивания, оползней, образования при резком повышении уровня воды в реке Подкумок при аномаль-

ных ливнях или паводках, а также при таянии ледников вулкана Эльбрус при его активизации. На экологическую ситуацию могут повлиять в качестве источников загрязняющих веществ и многочисленные рудные залежи урана, которые вполне вероятны не только на Бештаугорской площади, но и на остальных многочисленных магматических диапирах и криптолакколитах территории КМВ, в том числе и на горе Машук. Они приурочиваются, в первую очередь, к зонам субвертикальной деструкции как в резонансных зонах растяжения, так и в зонах сжатия, а также к геодинамическим центрам.

Выводы

1. В работе показана уникальность природного объекта горы Машук и прилегающих территорий, в первую очередь, города Пятигорск с его многочисленными достопримечательностями.

2. Представлена новая теоретическая база и методология научных исследований, на основе которых доказано своеобразие геоморфологического, геолого-тектонического строения, геодинамических и экологических условий территории горы Машук и прилегающих территорий.

3. В городе Пятигорске по комплексу признаков, разработанных автором ранее [Харченко и др., 2022], прогнозируются точные места будущих катастрофических землетрясений, в первую очередь, это плотина водохранилища на реке Подкумок в городе Пятигорске. Кроме разрушения плотины и близлежащих строений вероятно затопление строений на территории высокой поймы и также первой террасы ниже по течению реки Подкумок.

4. На основе анализа сейсмогеологических данных и результатов интерпретации СЦТ представлены глубинные геолого-тектонические и геодинамические условия, что позволяет доказать приуроченность горы Машук к геодинамическому центру СЦТ, уникальность геоморфологического строения, механизм возникновения объекта «Провала» и разнообразие типов минеральных источников, а также возможность загрязнения с Бештаугорской площади радионуклидами отдельных водоносных горизонтов на исследуемой территории.

5. Гора Машук занимает центральное место на территории КМВ не только географически, но и в геолого-тектоническом плане, что наглядно подтверждается ее приуроченностью не только к выступу фундамента, но и к апикальной части зоны разуплотнения на глубине не более 10 км, а также к субвертикальному тектоническому нарушению, выходящему на дневную поверхность.

6. Глубинным строением практически объясняются геоморфологические особенности (наличие травертиновых структурно-аккумулятивных террас), многообразие минеральных источников и сейсмичность территории.

7. На основе проведенного рудонефтегазогеологического районирования территории, в целях предупреждения катастрофического землетрясения, рекомендуется организация комплексного мониторинга и бурения системы «разгрузочных» скважин на термальные и минеральные воды, а по периферии площади в благоприятных условиях (суперрезонансных зонах) также поисковых скважин на нефть и газ.

Литература

1. Герасимов И.П. Пятигорские «лакколиты» и происхождение кавказских минеральных вод. // Геоморфология. – 1974. – №3. – С. 3–13.
2. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975. – 327 с.

3. Гниловской В.Г. Землетрясения Ставропольской возвышенности: Материалы по изучению Ставропольского края. Вып. №1. – Ставрополь, 1949.
4. Корчуганова Н.И., Корсаков А.К. Дистанционные методы геологического картирования: учебник. – М.: КДУ, 2009. – 288 с.
5. Летавин А.И., Орел В.Е., Чернышев С.М. и др. Тектоника и нефтегазоносность Северного Кавказа. – М.: Наука, 1987. – 94 с.
6. Милосердова Л.В., Динцова К.И., Хафизов С.Ф., Исказиев К.О., Осипов А.В. Связь линеаментов и узлов их пересечений с нефтегазоносностью Прикаспийской синеклизы и ее обрамления. // Нефтяное хозяйство. – 2021. – №6. – С. 22–26. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-6-22-26
7. Павлинов В.Н. Общие черты строения лакколлитов района Кавказских минеральных вод. – Ставрополь, 1973. – 396 с.
8. Рогожин Е.А., Солодилов Ю.В., Исмаилзаде Т.А. Тенденция развития сейсмичности Кавказа и сейсмогенерирующие зоны Ставрополя. // Разведка и охрана недр. – 1998. – №2. – С. 23-28.
9. Соболев Н.Д., Лебедев-Зиновьев А.А. и др. Неогеновые интрузивы и домезозойский фундамент района Кавказских Минеральных вод. // Труды ВИМС. – 1959. – Т. 3.
10. Соколов Б.А., Абля Э.А. Флюидодинамическая модель нефтегазообразования. – М.: ГЕОС, 1999. – 76 с.
11. Стогний В.В., Заалишвили В.Б., Пономарева Н.Л. Современная геодинамика и сейсмичность Северного Кавказа: проблемы мониторинга. Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №2. – С. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003
12. Тяпкин К.Ф., Довбнич М.М. Вращение Земли – единственный реальный источник энергии ее тектогенеза. // Фундаментальные проблемы геотектоники: мат-лы совещания. – 2007. – Т. 2. – С. 295–301.
13. Хаин В.Е. Основные проблемы современной геологии (Геология на пороге XXI века). – М.: Наука, 1995. С. 187.
14. Хаин В.Е., Полетаев А.И. Ротационная тектоника: предыстория, современное состояние, перспективы развития. // Ротационные процессы в геологии и физике. – М.: КомКнига, 2007. – С. 12–101.
15. Харченко В.М., Колядова Г.В., Галай Б.Ф., Бейтуганова М.А. Геотектоника и геодинамика структур растяжения континентов и океанов, связь с рудонефтегазоносностью и сейсмичностью. // Наука. Инновации. Технологии. – 2018. – №1. – С. 181–194.
16. Харченко В.М., Черненко К.И., Еремина Н.В., Самусев Д.Д. Некоторые закономерности формирования и распространения рифогенных построек в триасовых отложениях на территории Восточного Предкавказья в связи с нефтегазоносностью. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №3. – С. 133–145. DOI: 10.46698/VNC.2022.80.35.009
17. Gaidzik K., Więsek M., Seismo-lineaments and potentially seismogenic faults in the overriding plate of the Nazca-South American subduction zone (S Peru). // Journal of South American Earth Sciences. – 2021. – Vol 109. DOI: 10.1016/j.jsames.2021.103303
18. Jie Liao, Lun Li, Rui Gao, Yongqiang Shen, Jiarong Qing, Yangming Wu. Geodynamic modeling on subduction-spreading interaction and implications for the South China Sea and surrounding regions. // Geosystems and Geoenvironment. – 2023. – Vol. 2. Is. 2. – p. 100143. DOI: 10.1016/j.geogeo.2022.100143
19. Ryan M.C., Forsythe P., Grossmeier C., Laliberte M., Yagle B. Experiments on the evolution of laccolith morphology in plan-view. // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2017. – Vol. 336. – pp. 155-167. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2017.02.017
20. Volpe G., Pozzi G., Carminati E., Barchi M.R., Scuderi M.M., Tinti E., Aldega L., Marone C., Collettini C. Frictional controls on the seismogenic zone: Insights from the Apenninic basement, Central Italy. // Earth and Planetary Science Letters. – 2022. – Vol. 583. DOI: 10.1016/j.epsl.2022.117444
21. Pang G., Koper K.D. Excitation of Earth's inner core rotational oscillation during 2001–

2003 captured by earthquake doublets. // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2022. – Vol. 584. DOI: 10.1016/j.epsl.2022.117504

22. Umurzakov R.A., Rabbimkulov S.A. Possibilities of mapping neotectonic elements based on the interpretation of space images: A study of Fergana Depression. // *Geodesy and Geodynamics*. – 2022. – Vol. 13. Is. 6. – pp. 602-608. DOI: 10.1016/j.geog.2022.06.003

23. Lewis A.O. 2.01 – Tectonic Geomorphology: A Perspective. // *Treatise on Geomorphology (Second Edition)*. – 2022. – Vol. 2. – pp 1-12. DOI: 10.1016/B978-0-12-818234-5.00155-3

24. Martínez F., López C., Bascañan S., Arriagada C. Tectonic interaction between Mesozoic to Cenozoic extensional and contractional structures in the Preandean Depression (23°–25°S): Geologic implications for the Central Andes. // *Tectonophysics*. – 2018. – Vol. 744. – pp. 333-349. DOI: 10.1016/j.tecto.2018.07.016

25. Vinnik L.P., Kosarev G.L., Makeyeva L.I., Oreshin S.I. The Caucasus and the Caspian basin: topography of deep seismic boundaries. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2021. – Vol. 57. No.4. – pp. 479-491. DOI: 10.1134/S1069351321040108.

26. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Mel'kov D.A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of northern Caucasus. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014a. – Vol. 50(2). – pp. 263–272.

27. Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014b. – Vol. 50(5). – pp. 707–718.

28. Zaalishvili V., Mel'kov D., Kanukov A., Dzeranov B. Spectral-temporal features of seismic loadings on the basis of strong motion wavelet database. // *International Journal of GEOMATE*. – 2016. – Vol. 10(1). – pp. 1656–1661.

References

1. Gerasimov I.P. Pyatigorsk “laccoliths” and the origin of the Caucasian mineral waters. *Geomorphology*. 1974. No. 3. pp. 3–13. (In Russ.)
2. Gzovsky M. V. Basics of tectonophysics. Moscow. Nauka. 1975. 327 p. (In Russ.)
3. Gnilyovskoy V.G. Earthquakes of the Stavropol Upland: Materials for the study of the Stavropol Territory. Moscow. 1949. Issue No. 1. (In Russ.)
4. Korchuganova N.I., Korsakov A.K. Remote methods of geological mapping: textbook. Moscow, KDU. 2009. 288 p. (In Russ.)
5. Letavin A.I., Orel V.E., Chernyshev S.M. et al. Tectonics and oil-and-gas potential of the North Caucasus. Moscow, Nauka. 1987. 94 p. (In Russ.)
6. Miloserdova L.V., Dintsova K.I., Khafizov S.F., Iskazyev K.O., Osipov A.V. Relationship between lineaments and nodes of their intersections with the oil and gas potential of the Caspian syncline and its framing. *Oil industry*. 2021. No. 6. pp. 22–26. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-6-22-26. (In Russ.)
7. Pavlinov V.N. General features of the structure of laccoliths in the region of the Caucasian Mineral Waters. Stavropol, 1973. 396 p. (In Russ.)
8. Rogozhin E.A., Solodilov Yu.V., Ismail-Zade T.A. Seismicity development trend in the Caucasus and seismogenic zones of Stavropol. *Exploration and protection of mineral resources*. Moscow. 1998, No. 2, pp. 23–28. (In Russ.)
9. Sobolev N.D., Lebedev-Zinoviev A.A., Nazarova A.S. et al., Neogene intrusions and the pre-Mesozoic basement of the Caucasian Mineralnye Vody region. *Tr. VIMS*, Vol. 3. 1959. (In Russ.)
10. Sokolov B.A., Ablya E.A. Fluidodynamic model of oil and gas formation. Moscow, GEOS. 1999. 76 p. (In Russ.)
11. Stogny V.V., Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Ponomareva N.L. Modern geodynamics and seismicity of the North Caucasus: problems of monitoring. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003. (in Russ.)
12. Tyapkin K.F., Dovbnich M.M. The rotation of the Earth is the only real source of energy

for its tectogenesis. Fundamental problems of geotectonics, materials of the meeting. Vol. 2. 2007. pp. 295–301. (in Russ.)

13. Khain V.E. The main problems of modern geology (Geology on the threshold of the XXI century). Moscow. Nauka. 1995. p. 187. (in Russ.)

14. Khain V.E., Poletaev A.I. Rotational tectonics: prehistory, current state, development prospects. Rotational processes in geology and physics. Moscow. KomKniga, 2007. pp. 12–101. (in Russ.)

15. Kharchenko V.M., Kolyadova G.V., Galai B.F., Beituganova M.A. Geotectonics and geodynamics of extension structures of continents and oceans, connection with ore and gas potential and seismicity. Science. Innovation. Technologies. 2018. No. 1. pp. 181–194. (in Russ.)

16. Kharchenko V.M., Chernenko K. I., Yeriomina N.V., Samusev D.D. Some patterns of formation and distribution of reef buildups in Triassic deposits on the territory of the Eastern Fore-Caucasus in connection with oil-and-gas potential. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 3. pp. 133–145. DOI: 10.46698/VNC.2022.80.35.009. (in Russ.)

17. Gaidzik K., Więsek M., Seismo-lineaments and potentially seismogenic faults in the overriding plate of the Nazca-South American subduction zone (S Peru). Journal of South American Earth Sciences. 2021. Vol. 109. DOI: 10.1016/j.jsames.2021.103303.

18. Jie Liao, Lun Li, Rui Gao, Yongqiang Shen, Jiarong Qing, Yangming Wu Geodynamic modeling on subduction-spreading interaction and implications for the South China Sea and surrounding regions. Geosystems and Geoenvironment. 2023. Vol. 2, Issue 2. 100143, DOI: 10.1016/j.geogeo.2022.100143.

19. Ryan M. Currier, Patrick Forsythe, Corinne Grossmeier, Michael Laliberte, Brian Yagle. Experiments on the evolution of laccolith morphology in plan-view. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 15 April 2017. Vol. 336. pp. 155–167. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2017.02.017.

20. Volpe G., Pozzi G., Carminati E., Barchi M.R., Scuderi M.M., Tinti E., Aldega L., Marone C., Collettini C. Frictional controls on the seismogenic zone: Insights from the Apenninic basement, Central Italy. Earth and Planetary Science Letters. 1 April 2022. Vol. 583. DOI: 10.1016/j.epsl.2022.117444.

21. Pang G., Koper K.D. Excitation of Earth's inner core rotational oscillation during 2001–2003 captured by earthquake doublets. Earth and Planetary Science Letters. 15 April 2022. Vol. 584. DOI: 10.1016/J.EPSL.2022.117504.

22. Umurzakov R.A., Rabbimkulov S.A. Possibilities of mapping neotectonic elements based on the interpretation of space images: A study of Fergana Depression. // Geodesy and Geodynamics. November 2022. Vol. 13. Issue 6. pp. 602–608. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2022.06.003>

23. Lewis A.O. Tectonic Geomorphology: A Perspective. Treatise on Geomorphology (Second Edition). 2022. Vol. 2. pp. 1–12. DOI: 10.1016/B978-0-12-818234-5.00155-3.

24. Martínez F., López C., Bascuñan S., Arriagada C. Tectonic interaction between Mesozoic to Cenozoic extensional and contractional structures in the Preandean Depression (23°–25°S): Geologic implications for the Central Andes. Tectonophysics. 2 October 2018. Vol. 744. pp. 333–349. DOI: 10.1016/j.tecto.2018.07.016

25. Vinnik L.P., Kosarev G.L., Makeyeva L.I., Oreshin S.I. The Caucasus and the Caspian basin: topography of deep seismic boundaries. Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2021. Vol. 57. No. 4. pp. 479–491. DOI: 10.1134/S1069351321040108.

26. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Mel'kov D.A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of northern Caucasus. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 2014a. Vol. 50(2). pp. 263–272.

27. Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 2014b. Vol. 50(5). pp. 707–718.

28. Zaalishvili V., Mel'kov D., Kanukov A., Dzeranov B. Spectral-temporal features of seismic loadings on the basis of strong motion wavelet database. International Journal of GEOMATE. 2016. Vol. 10(1). pp. 1656–1661.

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.3

DOI: [10.46698/VNC.2023.17.83.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.17.83.005)

Оригинальная статья

Связь величины макросейсмической интенсивности с различными показателями инструментальных записей колебаний грунтовой толщи

М.И. Фидарова , **В.Б. Заалишвили** , **Д.А. Мельков** 

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

Статья поступила: 01.02.2023, доработана: 03.03.2023, одобрена в печать: 09.03.2023

Резюме: Актуальность работы. Являясь объективной характеристикой выделенной сейсмической энергии величина макросейсмической интенсивности должна иметь связь с инструментальными параметрами сейсмических колебаний. Традиционно сейсмические воздействия в практике сейсмостойкого строительства оцениваются величиной пикового горизонтального ускорения грунта. Но движение грунта, вызванное землетрясением, является сложным, и для количественного отражения характеристик движения грунта предложен целый ряд параметров. В настоящее время нет общепризнанного мнения, какая из характеристик наилучшим образом описывает макросейсмическую интенсивность. **Целью** работы является сопоставление имеющихся интегральных характеристик инструментальной интенсивности и различных комбинаций параметров с сейсмической интенсивностью по данным сети K-net. **Методы работы.** В соответствии с поставленной задачей необходимо использовать интерпретируемую модель, которой является регрессия. Использовался метод опорных векторов. Для оценки эффективности моделей с наиболее равномерным использованием имеющихся данных применялась процедура кроссвалидации (перекрестной проверки). **Результаты работы.** В результате установлено наилучшее соответствие макросейсмической интенсивности пиковых горизонтальных скоростей ($R^2=0,76$. MAE=0,29). Введение дополнительного параметра позволяет повысить R^2 до 0,8–0,85 и снизить MAE до 0,22–0,27. Метрики оценены по тестовой выборке. Наилучшие показатели достигаются для модели с комбинацией среднеквадратической скорости и меры Фаджфара. Учитывая, что мера Фаджфара представляет собой произведение пиковой скорости на корень четвертой степени из продолжительности новый параметр можно рассматривать как модифицированную меру Фаджфара.

Ключевые слова: сейсмическая интенсивность, инструментальные параметры, базы данных сильных движений.

Для цитирования: Фидарова М.И., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А. Связь величины макросейсмической интенсивности с различными показателями инструментальных записей колебаний грунтовой толщи. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(1): 59–75. DOI: 10.46698/VNC.2023.17.83.005.

GEOPHYSICS

DOI: [10.46698/VNC.2023.17.83.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.17.83.005)

Original paper

Correlation between the magnitude of macroseismic intensity and various indicators of instrumental records of fluctuations in the soil stratum

M.I. Fidarova , V.B. Zaalishvili , D.A. Melkov 

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

Received: 01.02.2023, revised: 03.03.2023, accepted: 09.03.2023

Abstract: Relevance. As an objective characteristic of the released seismic energy, the value of macroseismic intensity should be related to the instrumental parameters of seismic vibrations. Traditionally, seismic impacts in the practice of earthquake-engineering are estimated by peak values of horizontal ground acceleration. Earthquake-induced ground motion is complex, and a number of another parameters have been proposed to quantify ground motion characteristics. At present, there is no generally accepted opinion which of the characteristics describes the macroseismic intensity in the best manner. **The aim** of this work is to compare the available integral characteristics of instrumental intensity and various combinations of parameters with seismic intensity according to K-net network data. **Methods.** In accordance with the task, it is necessary to use an interpretable model, which is regression. The support vector machine was used. To evaluate the effectiveness of models with the most uniform use of available data, a cross-validation procedure was used. **Results.** As a result, the best correspondence to the macroseismic intensity of the peak horizontal velocity was established ($R^2 = 0.76$, MAE = 0.29). The introduction of an additional parameter allows increasing R^2 to 0.8-0.85 and reducing MAE to 0.22-0.27. The metrics are estimated from the test set. The best performance is achieved for the model with the combination of root mean square velocity and the Fajfar measure. Considering that the Fajfar measure is the product of the peak horizontal velocity and the fourth root of the duration, the new parameter can be considered as a modified Fajfar measure.

Keywords: seismic intensity, instrumental parameters, strong motion databases.

For citation: Fidarova M.I., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Correlation between the magnitude of macroseismic intensity and various indicators of instrumental records of fluctuations in the soil stratum. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(1): 59-75. DOI: 10.46698/VNC.2023.17.83.005.

Введение

Макросейсмическая интенсивность представляет собой локальную меру степени ущерба от землетрясения и сотрясения грунта при землетрясении, о чем свидетельствуют наблюдаемые повреждения и реакция различных элементов и человека. Инструментальные оценки интенсивности, основанные на зависимости между сейсмической интенсивностью и инструментальными измерениями, широко используются в различных областях инженерной сейсмологии и управления сейсмическими рисками [Trifunac, Brady, 1975; Wald et al., 1999; Musson et al., 2009; Caprio et al., 2015; Sokolov, Furumura, 2008; Zhang et al., 2012; Zaalishvili et al., 2014a, b, 2016, 2020; Koliopoulos et al., 1998; Габеева, Бурдзиева, 2008; Заалишвили, 2009; Курбанов и др., 2022]. Кроме того, макросейсмическая интенсивность по-прежнему часто яв-

ляется единственным наблюдаемым параметром для количественной оценки уровня серьезности колебаний грунта во многих городах, где нет сейсмометрических инструментов. Кроме того, макросейсмическая интенсивность является единственной доступной мерой интенсивности доинструментальных исторических землетрясений [Masi et al., 2020].

Являясь объективной характеристикой выделенной сейсмической энергии величина макросейсмической интенсивности должна иметь связь с инструментальными параметрами сейсмических колебаний. Традиционно сейсмические воздействия в практике сейсмостойкого строительства оцениваются величиной пикового горизонтального ускорения грунта. Такой подход, являясь простым и удобным для практического использования, отражен в строительных нормах для сейсмостойкого проектирования и строительства в сейсмически опасных районах большинства стран мира. Но движение грунта, вызванное землетрясением, является сложным, и для количественного отражения характеристик движения грунта может использоваться несколько параметров, а не один. Амплитуда, частотный состав и продолжительность являются наиболее важными характеристиками в воззрениях инженерного сообщества [Kramer, 1996; Karimzadeh, Askan, 2021]. Повышение надежности расчетов возможно только путем задания сейсмических воздействий в энергетических характеристиках колебаний грунта [Аптикаев, 2021].

Поэтому различными авторами было предложено большое количество различных параметров, которые можно разделить на следующие категории: – амплитудные: максимальные скорости (PHV), смещения (PHD) и ускорения (PHA), среднеквадратическое ускорение (RMS); – спектральные параметры: частота максимума спектра Фурье (f_{max}), средневзвешенная частота (f_{aw}); – энергетические параметры, такие как площадь спектра (Sr), кумулятивная абсолютная скорость (CAV), кумулятивный квадрат ускорений (интенсивность Ариаса), индекс полной входной энергии (E_r), продолжительность колебаний (Duration), которая также может определяться различными способами и производные от данных параметров – например мера Фаджфара (Fajfar), площадь нормированного спектра (S_r), а также параметры спектра реакции – интенсивность Хаузнера (Hausner intensity). Описание всех признаков и соответствующие формулы приведены в предыдущей работе [Заалишвили и др., 2022].

Цель данной работы состоит в сопоставлении имеющихся интегральных параметров инструментальной интенсивности и их различных комбинаций по данным сети K-net и установление как статистических, так и физических обоснований. В соответствии с этим необходимо использовать интерпретируемую модель, которой является регрессия.

Метод опорных векторов

Метод опорных векторов (support vector), называемый ранее алгоритмом «обобщенного портрета», был разработан советскими математиками В.Н. Вапником и А.Я. Червоненкисом (1974) и с тех пор приобрел широкую популярность. Основная идея классификатора на опорных векторах заключается в том, чтобы строить разделяющую поверхность с использованием только небольшого подмножества точек, лежащих в зоне, критической для разделения. Данный метод может быть эффективно использован для решения задач регрессии [Smola, Schölkopf, 2004].

В основе метода опорных векторов для задач регрессии или регрессии опорных векторов (SVR) лежит поиск гиперплоскости, при которой риск в многомерном пространстве будет минимальным. По сравнению с традиционной регрессионной моделью SVR оценивает коэффициенты путем минимизации квадратичных потерь. Так, если прогнозное значение попадает в область гиперплоскости, то потери равны нулю. В противном случае разности прогнозного и фактического значений.

Преимущества метода опорных векторов перед методом наименьших квадратов:

1. SVR более устойчив к выбросам в данных. В отличие от метода наименьших квадратов, на который могут сильно повлиять выбросы, SVR использует функцию потерь, которая штрафует большие ошибки, поэтому они меньше влияют на общую точность модели.

2. SVR более гибок в своей способности моделировать нелинейные данные, чем метод наименьших квадратов, который ограничен только линейными моделями. Это делает его полезным для моделирования сложных отношений между переменными, которые могут быть нелинейными по своей природе.

3. SVR имеет лучшие возможности обобщения, чем метод наименьших квадратов, поскольку он использует методы регуляризации, чтобы избежать переобучения и улучшить свою способность точно обобщать невидимые точки данных.

Расчеты выполнялись с использованием библиотеки `sklearn`. Для оценки эффективности моделей с наиболее равномерным использованием имеющихся данных применялась процедура кроссвалидации (перекрестной проверки) [Hastie, 2009].

Данные

В Геофизическом институте ВНИИ РАН создана база данных сильных движений, включающая данные со всего мира (США, Япония, Тайвань, Греция, Грузия) [Заалишвили и др., 2013]. Для анализа в данной работе были отобраны записи землетрясений, зарегистрированных системой KNET (Япония, www.kyoshin.bosai.go.jp) [National Research..., 2019]. База содержит более 10 000 записей на 1000 станций с различными грунтовыми условиями с интенсивностью MSK от 5 баллов и выше, начиная с мая 1996 г по декабрь 2013 г. Также в базе данных содержатся записи землетрясений с малыми эпицентрными расстояниями от 0 до 3 км.

Из базы данных была сделана выборка, содержащая 150 записей с различными эпицентрными расстояниями, магнитудами и грунтовыми условиями. Набор данных был дополнен логарифмами параметров для последующего регрессионного анализа. Данные были отцентрированы и нормированы на дисперсию. Соответствующие распределения приведены на рисунке 1. Видно, что данные имеют логнормальное распределение. Соответствующая коробочная диаграмма приведена на рисунке 2. Коробочная диаграмма описывает распределение набора данных, показывая медиану, квартили, диапазон и выбросы. Блочная диаграмма — это графическое представление числовых данных, основанное на сводке из пяти чисел. Она состоит из поля, в котором заключены средние 50% данных (межквартильный диапазон), с линиями, выходящими из поля, чтобы показать остальную часть распределения. Нижняя линия представляет 25-й перцентиль (Q1), а верхняя линия представляет 75-й перцентиль (Q3). Медиана представлена линией внутри этого прямоугольника. Далее показаны выбросы, которые могут присутствовать в наборе данных в интервале; разность первого квартиля и полутора межквартильных расстояний; сумма третьего квартиля и полутора межквартильных расстояний. Данные, выходящие за

пределы указанных интервалов, обычно считаются выбросами. Хорошо видно, что в логарифмическом масштабе «выбросов» значительно меньше. Выбросы не были исключены из набора данных по двум причинам: во-первых, они могут содержать данные важные для анализа и, во-вторых, метод опорных векторов хорошо справляется с подобными выбросами.

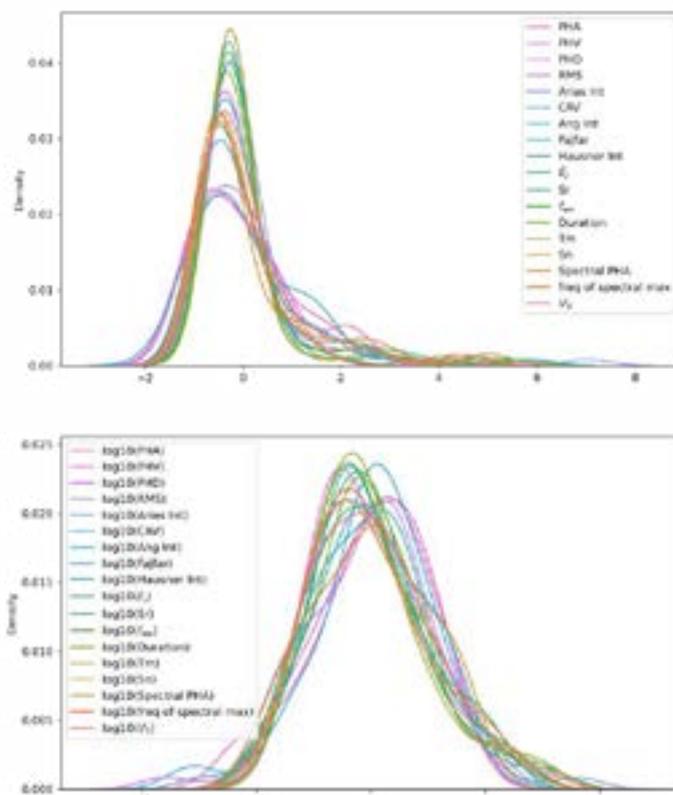


Рис. 1. Распределение нормированных данных /
 Fig. 1. Distribution of normalized data

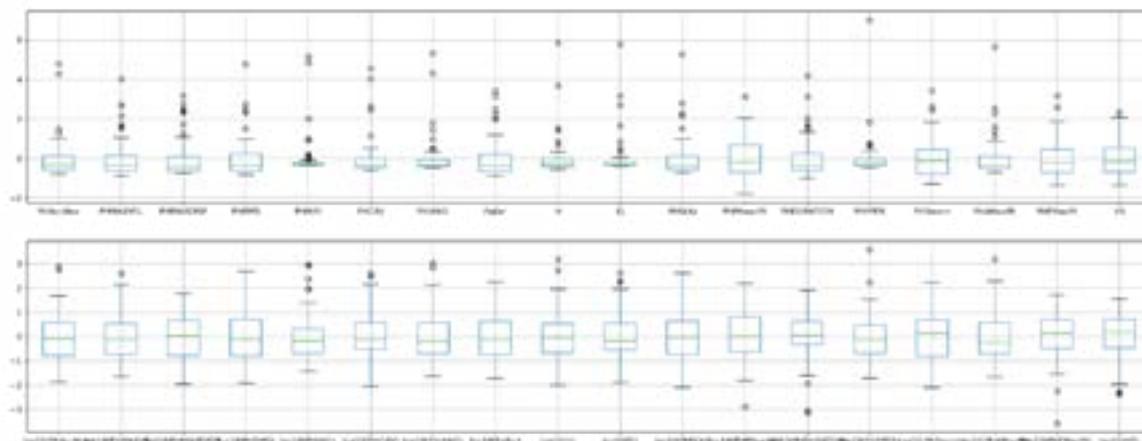


Рис. 2. Коробочная диаграмма исходных данных: анализируемых параметров (а) и параметров в логарифмическом масштабе (б) /
 Fig. 2. Box diagram of the initial data: analyzed parameters (a) and parameters on a logarithmic scale (b)

Результаты работы и их обсуждение

На первом этапе исследовалась зависимость сейсмической интенсивности от каждого параметра в отдельности. Все результаты приведены в таблице 1. Рассчитаны параметры критерия Фишера (F-test), уровня значимости (p-value), коэффициент детерминации R^2 , средние абсолютные (MAE) и среднеквадратические (RMS) отклонения. Для критерия Фишера рассчитаны соответствующие вероятности, значения p-value более 0,05 выделены жирным шрифтом. Следует отметить, что критерий для p-value <0,05 является необходимым, но вовсе не достаточным условием выбора модели. В частности значительное количество параметров, для которых выполняется p-value <0,05, имеют низкий R^2 . Наилучший результат получен для пиковой скорости с коэффициентом детерминации $R^2=0,76$, причем, не только в логарифмическом, но и в линейном масштабе с $R^2=0,73$ (рис. 3). Зависимости для различных инструментальных мер приведены на рисунке 4. Для спектральных характеристик прямой зависимости не получено (рис. 5). Относительно высокое значение коэффициента детерминации $R^2=0,59$ получено для меры Фаджфара.

Таблица 1 / Table 1

Регрессионные модели для одного параметра. / Regression models for one parameter

	Parameters	F-test	F%	pi-value	R2	MAE	RMSE	Coeff	Intercept	Coeff norm	Intercept norm
1	log10(PHV)	263.71	1.00	3.04E-23	0.76	0.29	0.34	3.3156	3.73	0.9388	7.17
2	PHV	210.82	1.00	5.68E-21	0.73	0.31	0.36	0.0920	5.87	1.0339	7.14
3	log10(Fajfar)	144.55	1.00	2.18E-17	0.59	0.34	0.45	2.5904	3.56	0.8462	7.16
4	RMS	49.49	1.00	2.56E-09	0.56	0.42	0.46	0.0207	6.26	1.0201	7.27
5	log10(Hausner Int)	37.95	1.00	7.39E-08	0.47	0.41	0.51	1.9373	3.93	0.7456	7.11
6	log10(Spectral PHA)	146.73	1.00	1.59E-17	0.36	0.47	0.56	2.9171	2.29	0.9150	7.23
7	Spectral PHA	105.69	1.00	1.1E-14	0.32	0.44	0.58	0.0136	6.22	1.0351	7.15
8	PHA	82.76	1.00	9.17E-13	0.32	0.46	0.58	0.0031	6.30	0.8226	7.13
9	Fajfar	167.70	1.00	9.28E-19	0.30	0.46	0.59	0.0315	5.99	0.9301	7.03
10	Ang Int	79.58	1.00	1.79E-12	0.22	0.50	0.62	1.94e-4	6.66	0.8162	7.08
11	log10(Ang Int)	197.81	1.00	2.41E-20	0.16	0.56	0.64	2.1889	0.70	1.0046	7.28
12	log10(RMS)	58.57	1.00	2.34E-10	0.15	0.59	0.65	2.7436	3.15	0.9402	7.36
13	Hausner Int	10.05	1.00	0.0024	0.09	0.54	0.67	3.58e-3	6.70	0.4138	6.96
14	log10(PHD)	28.69	1.00	1.53E-06	0.09	0.58	0.67	1.0068	6.79	0.5996	7.19
15	Arias Int	56.53	1.00	3.94E-10	0.07	0.55	0.67	5.13e-5	6.81	0.7195	7.06
16	freq of spectral max	1.06	0.69	0.306465	0.07	0.57	0.68	-0.0172	7.05	-0.0533	6.98
17	PHD	20.49	1.00	3.03E-05	0.03	0.55	0.69	0.0925	6.43	0.6578	6.95
18	log10(Arias Int)	217.62	1.00	2.74E-21	0.00	0.56	0.70	1.5376	2.61	0.9765	7.24
19	CAV	66.09	1.00	3.71E-11	0.00	0.55	0.70	5.07e-4	6.53	0.8187	7.06
20	E j	55.39	1.00	5.28E-10	-0.01	0.57	0.70	2.39e-6	6.73	0.8310	7.06
21	log10(f_aw)	0.01	0.06	0.94	-0.02	0.59	0.71	-0.3995	7.30	-0.0696	6.95
22	Tm	0.50	0.52	0.48	-0.03	0.60	0.71	-0.0984	7.05	-0.0885	7.00
23	Sr	64.84	1.00	5E-11	-0.04	0.57	0.72	1.59e-3	6.42	0.8667	7.11
24	log10(Tm)	0.01	0.08	0.92	-0.07	0.60	0.72	-0.1678	6.89	-0.0628	6.97
25	log10(freq of spectral max)	0.01	0.08	0.92	-0.07	0.60	0.72	0.1678	6.89	0.0628	6.98
26	log10(E_j)	101.69	1.00	2.27E-14	-0.07	0.49	0.73	1.2498	1.59	0.8912	7.16
27	f_aw	0.15	0.30	0.7	-0.08	0.60	0.73	-0.0451	7.31	-0.1433	6.94
28	log10(Sn)	0.33	0.43	0.57	-0.09	0.60	0.73	-0.3487	7.20	-0.0845	6.95
29	Sn	0.04	0.15	0.85	-0.09	0.61	0.73	-0.0230	7.10	-0.0839	6.95
30	log10(Sr)	50.27	1.00	2.07E-09	-0.27	0.68	0.79	1.9346	2.49	0.8055	7.19
31	log10(PHA)	80.54	1.00	1.46E-12	-0.37	0.72	0.82	3.2066	0.02	0.9853	7.43
32	V_S	1.62	0.79	0.21	-0.41	0.70	0.83	8.28e-4	6.61	0.3547	7.17
33	Duration	0.69	0.59	0.41	-0.45	0.67	0.84	5.77e-3	6.69	0.2337	6.93
34	log10(Duration)	1.60	0.79	0.21	-0.51	0.71	0.86	0.5703	6.20	0.2731	7.01
35	log10(CAV)	69.99	1.00	1.5E-11	-0.51	0.66	0.86	1.7237	2.48	0.7767	7.23
36	log10(V_S)	2.69	0.89	0.11	-0.63	0.74	0.89	1.2293	3.87	0.3929	7.22

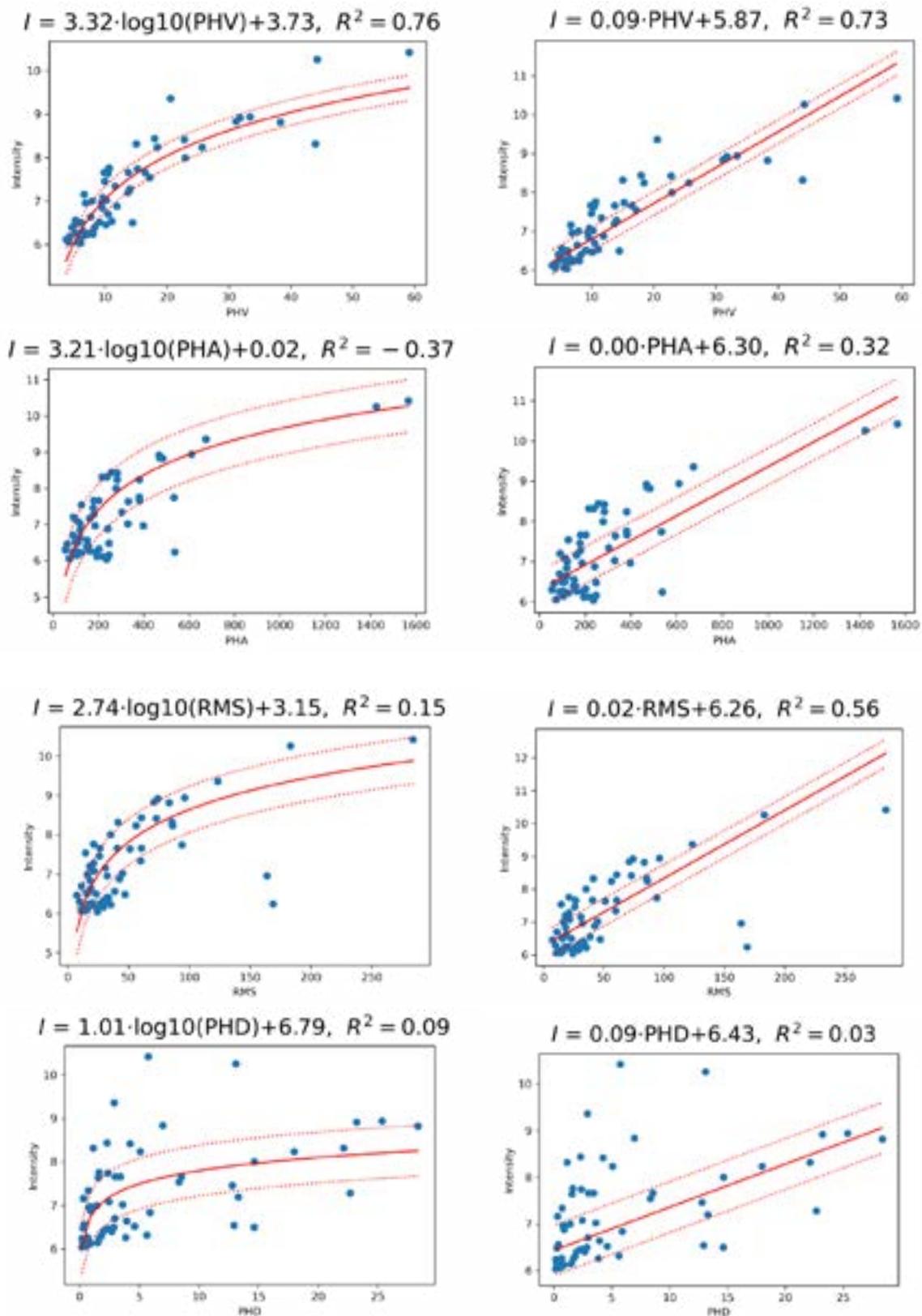


Рис. 3. Связь амплитудных характеристик с макросейсмической интенсивностью /
 Fig. 3. Relationship of amplitude characteristics with macroseismic intensity

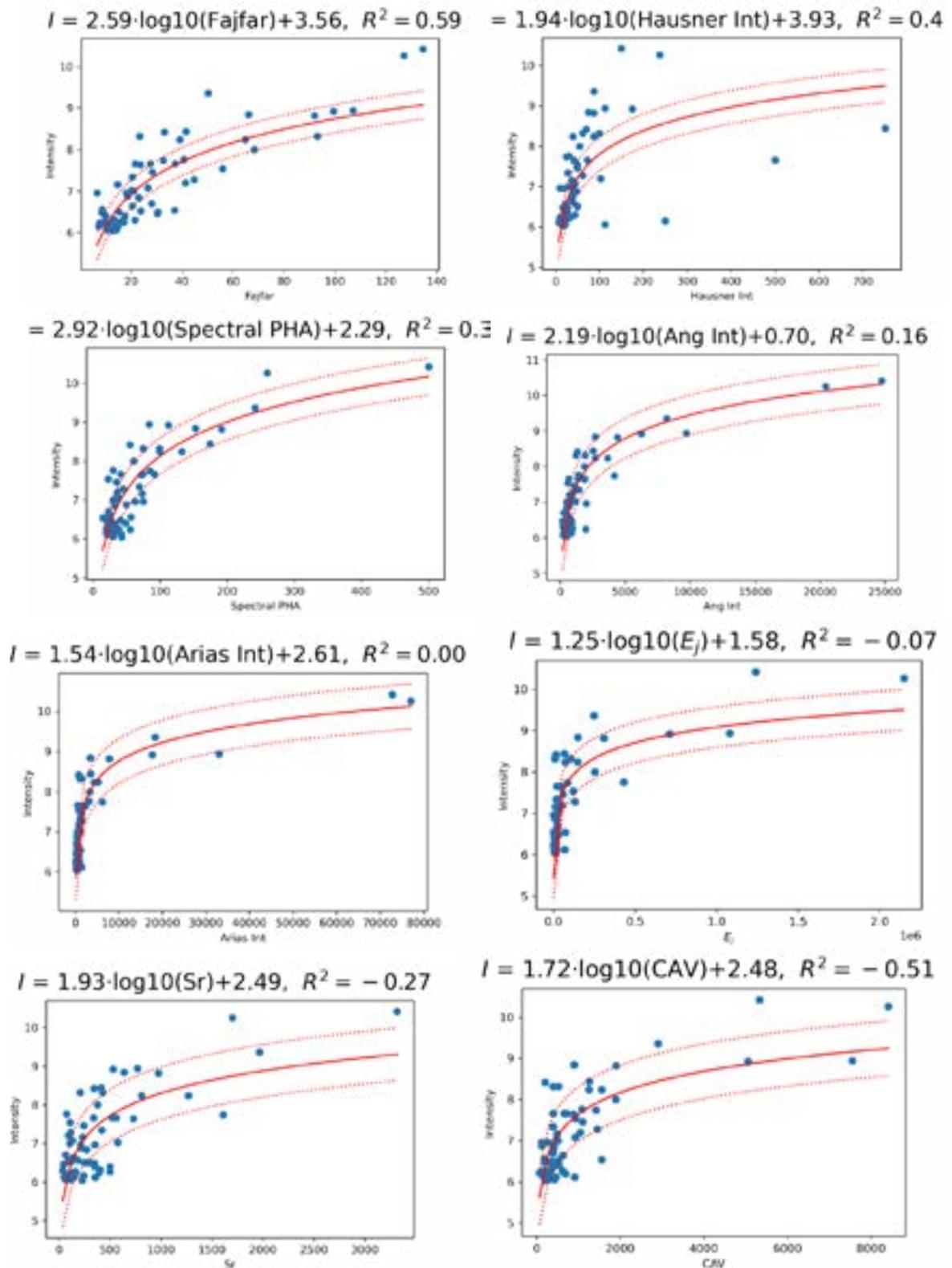


Рис. 4. Связь различных инструментальных мер с сейсмической интенсивностью /

Fig. 4. Connection of various instrumental measures with seismic intensity

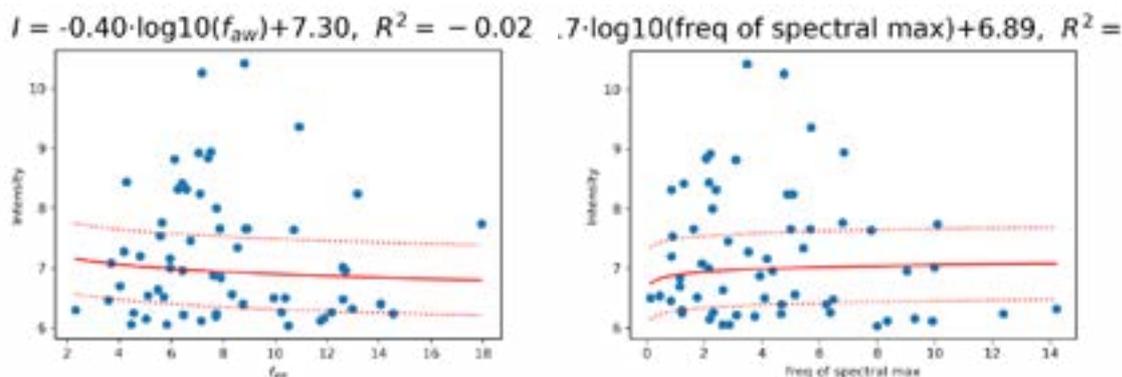


Рис. 5. Зависимость интенсивности от спектральных характеристик: средневзвешенной частоты (а) и частоты максимума спектра Фурье (б) /

Fig. 5. Dependence of intensity on spectral characteristics: weighted average frequency (a) and maximum frequency of the Fourier spectrum (b)

На следующем этапе рассмотрены регрессионные выражения зависимости интенсивности от двух параметров при различных их комбинациях. В таблице 2 приведены значения с максимальным R^2 до 0,7 и минимальными MAE до 0,35. Статистические критерии F-test, и p-value приведены для каждого из параметров. Нормированные коэффициенты также перечислены.

Комбинация двух параметров позволила повысить значения коэффициента детерминации, в частности при совместном использовании скорости и средневзвешенного ускорения до 0,82 и пиковой скорости до 0,8 (рис. 6). При этом наилучший результат получен для среднеквадратического значения ускорения (RMS) и меры Фаджфара (Fajfar). Далее следуют сочетания разных параметров с пиковой скоростью. Лучшее из них с кумулятивной абсолютной скоростью, $R^2=0,82$, MAE=0,22 (рис. 6). Модели на основе сочетания пиковой скорости с различными определениями ускорения (пиковыми PHA и среднеквадратическими RMS) приведены на рисунке 7. Интенсивность Анга занимает 6 и 7 места в рейтинге двух параметрических моделей (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Регрессионные модели для двух параметров. / Regression models for two parameters

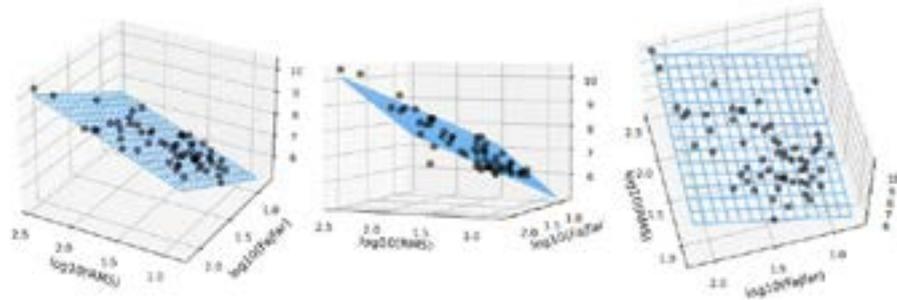
	Parameters	F-test	f%	pi-value	R2	MAE	RMSE	Coeff	Intercept	Coeff norm	Intercept norm
1	['log10(RMS)', 'log10(Fajfar)']	[58.58 144.55]	[1. 1.]	[2.34e-10 2.18e-17]	0.85	0.22	0.27	[1.52, 2.04]	2.04	[0.52 0.67]	7.21
2	['log10(PHV)', 'log10(CAV)']	[263.71 69.99]	[1. 1.]	[3.04e-23 1.50e-11]	0.82	0.22	0.29	[2.60, 0.55]	2.94	[0.74 0.25]	7.15
3	['RMS', 'log10(PHV)']	[49.49 263.71]	[1. 1.]	[2.56e-09 3.04e-23]	0.82	0.27	0.30	[0.006439, 2.74]	4.07	[0.32 0.77]	7.22
4	['PHA', 'log10(PHV)']	[82.76 263.71]	[1. 1.]	[9.17e-13 3.04e-23]	0.81	0.27	0.30	[0.001367, 2.54]	4.20	[0.37 0.72]	7.20
5	['PHV', 'log10(RMS)']	[210.82 58.58]	[1. 1.]	[5.68e-21 2.34e-10]	0.81	0.25	0.31	[0.0774, 0.73]	5.01	[0.87 0.25]	7.20
6	['log10(PHV)', 'log10(Ang Int)']	[263.71 197.81]	[1. 1.]	[3.04e-23 2.41e-20]	0.81	0.27	0.31	[1.75, 1.21]	1.76	[0.50 0.56]	7.23
7	['Ang Int', 'log10(PHV)']	[79.58 263.71]	[1. 1.]	[1.79e-12 3.04e-23]	0.81	0.27	0.31	[7.93e-05, 2.55]	4.37	[0.33 0.72]	7.19

	Parameters	F-test	f%	pi-value	R2	MAE	RMSE	Coeff	Intercept	Coeff norm	Intercept norm
8	['log10(PHV)', 'log10(RMS)']	[263.71 58.58]	[1. 1.]	[3.04e-23 2.34e-10]	0.80	0.25	0.31	[2.67, 0.96]	2.98	[0.76 0.33]	7.22
9	['RMS', 'log10(Fajfar)']	[49.49 144.56]	[1. 1.]	[2.56e-09 2.18e-17]	0.80	0.26	0.31	[0.01119, 2.11]	3.76	[0.53 0.69]	7.22
10	['Tm', 'log10(PHV)']	[0.50 263.71]	[0.52 1.]	[0.48 3.04e-23]	0.80	0.27	0.31	[-0.21, 3.33]	3.80	[-0.19 0.94]	7.15
11	['log10(PHV)', 'log10(V_S)']	[263.71 2.69]	[1. 0.89]	[3.04e-23 1.07e-01]	0.80	0.28	0.31	[3.11, 0.51]	2.60	[0.88 0.16]	7.22
12	['log10(PHA)', 'log10(PHV)']	[80.54 263.71]	[1. 1.]	[1.46e-12 3.04e-23]	0.80	0.27	0.31	[1.25, 2.45]	1.82	[0.38 0.69]	7.23
13	['log10(PHV)', 'log10(E_j)']	[263.71 101.69]	[1. 1.]	[3.04e-23 2.27e-14]	0.80	0.26	0.32	[2.37, 0.41]	2.88	[0.67 0.29]	7.17
14	['PHV', 'log10(PHV)']	[210.82 263.71]	[1. 1.]	[5.68e-21 3.04e-23]	0.80	0.28	0.32	[0.0467, 1.67]	4.77	[0.53 0.47]	7.16
15	['CAV', 'log10(PHV)']	[66.09 263.71]	[1. 1.]	[3.71e-11 3.04e-23]	0.79	0.28	0.32	[1.902e-4, 2.58]	4.27	[0.31 0.73]	7.15
16	['log10(PHA)', 'log10(freq of max)']	[80.54 0.009]	[1. 0.08]	[1.46e-12 0.92]	0.79	0.27	0.32	[3.65, -1.59]	-0.30	[1.12 -0.60]	7.31
17	['log10(PHA)', 'log10(Tm)']	[80.54 0.009]	[1. 0.08]	[1.46e-12 0.92]	0.79	0.27	0.32	[3.65, 1.59]	-0.30	[1.12 0.60]	7.31
18	['RMS', 'log10(freq of max)']	[49.49 0.009]	[1. 0.08]	[2.56e-09 0.92]	0.79	0.28	0.32	[0.02190, -0.58]	6.50	[1.08 -0.22]	7.23
19	['RMS', 'log10(Tm)']	[49.49 0.009]	[1. 0.08]	[2.56e-09 0.92]	0.79	0.28	0.32	[0.02190, 0.58]	6.50	[1.08 0.22]	7.26
20	['Spectral PHA', 'log10(PHV)']	[105.69 263.71]	[1. 1.]	[1.10e-14 3.04e-23]	0.79	0.26	0.32	[0.007748, 2.20]	4.42	[0.59 0.62]	7.23
21	['Arias Int', 'log10(PHV)']	[56.53 263.71]	[1. 1.]	[3.94e-10 3.04e-23]	0.79	0.29	0.32	[1.99e-05, 2.72]	4.25	[0.28 0.77]	7.17
22	['V_S', 'log10(PHV)']	[1.62 263.71]	[0.79 1.]	[0.21 3.04e-23]	0.78	0.30	0.33	[0.0003305, 3.16]	3.71	[0.14 0.90]	7.21
23	['E_j', 'log10(PHV)']	[55.39 263.71]	[1. 1.]	[5.29e-10 3.04e-23]	0.77	0.30	0.33	[8.24e-07, 2.65]	4.30	[0.29 0.75]	7.16
24	['log10(PHV)', 'log10(Spectral PHA)']	[263.71 146.74]	[1. 1.]	[3.04e-23 1.60e-17]	0.77	0.28	0.33	[2.23, 1.46]	2.43	[0.63 0.46]	7.21
25	['PHV', 'RMS']	[210.82 49.49]	[1. 1.]	[5.68e-21 2.56e-09]	0.77	0.28	0.33	[0.0852, 0.003167]	5.85	[0.96 0.16]	7.18
26	['log10(Ang Int)', 'log10(Tm)']	[197.81 0.009]	[1. 0.08]	[2.41e-20 0.92]	0.77	0.27	0.34	[2.29, 0.90]	0.86	[1.05 0.34]	7.28
27	['log10(Ang Int)', 'log10(freq of max)']	[197.81 0.009]	[1. 0.08]	[2.41e-20 0.92]	0.77	0.27	0.34	[2.29, -0.90]	0.86	[1.05 -0.34]	7.28
28	['PHV', 'log10(Sr)']	[210.82 50.27]	[1. 1.]	[5.68e-21 2.07e-09]	0.76	0.27	0.34	[0.077, 0.55]	4.77	[0.87 0.23]	7.20
29	['log10(PHV)', 'log10(\$f_{aw}\$)']	[263.71 0.005]	[1. 0.06]	[3.04e-23 9.43e-01]	0.76	0.32	0.34	[3.30, 0.84]	3.04	[0.94 0.15]	7.20
30	['Sn', 'log10(PHV)']	[0.035 263.71]	[0.15 1.]	[8.52e-01 3.04e-23]	0.76	0.30	0.34	[-0.0036, 3.30]	3.76	[-0.013 0.93]	7.16
31	['log10(PHV)', 'log10(Sn)']	[263.71 0.33]	[1. 0.43]	[3.04e-23 5.69e-01]	0.76	0.30	0.34	[3.29, -0.061]	3.79	[0.93 -0.015]	7.16
32	['Hausner Int', 'log10(PHV)']	[10.05 263.71]	[0.99 1.]	[2.43e-03 3.04e-23]	0.76	0.30	0.34	[0.000667, 3.24]	3.75	[0.077 0.92]	7.16
33	['PHV', 'log10(Spectral PHA)']	[210.82 146.73]	[1. 1.]	[5.67e-21 1.59e-17]	0.76	0.27	0.34	[0.0639, 1.31]	4.12	[0.72 0.41]	7.22

	Parameters	F-test	f%	pi-value	R2	MAE	RMSE	Coeff	Intercept	Coeff norm	Intercept norm
34	['PHV', 'log10(PHD)']	[210.82 28.69]	[1. 1.]	[5.67e-21 1.53e-06]	0.76	0.29	0.35	[0.085, 0.12]	5.93	[0.96 0.071]	7.16
35	['PHA', 'PHV']	[82.76 210.82]	[1. 1.]	[9.17e-13 5.68e-21]	0.75	0.30	0.35	[0.0007, 0.0788]	5.90	[0.19 0.89]	7.18
36	['PHV', 'log10(V_s)']	[210.82 2.69]	[1. 0.90]	[5.68e-21 1.07e-01]	0.75	0.30	0.35	[0.0899, 0.23]	5.29	[1.01 0.07]	7.16
37	['PHV', 'Tm']	[210.82 0.500]	[1. 0.52]	[5.68e-21 4.82e-01]	0.75	0.30	0.35	[0.093, -0.13]	5.94	[1.04 -0.12]	7.15
38	['freq of spectral max', 'log10(Ang Int)']	[1.06 197.81]	[0.70 1.]	[3.06e-01 2.41e-20]	0.75	0.26	0.35	[-0.13, 2.29]	0.88	[-0.39 1.05]	7.22
39	['PHV', 'log10(\$f_{aw}\$)']	[211 5.11e-03]	[1. 0.06]	[5.68e-21 9.43e-01]	0.75	0.30	0.35	[0.093, 0.28]	5.63	[1.05 0.048]	7.16
40	['log10(PHV)', 'log10(Fajfar)']	[263.71 144.56]	[1. 1.]	[3.04e-23 2.18e-17]	0.75	0.30	0.35	[3.63, -0.33]	3.86	[1.03 -0.11]	7.16
41	['PHV', '\$f_{aw}\$']	[2.11e+02 0.149]	[1. 0.30]	[5.68e-21 0.701]	0.75	0.30	0.35	[0.093, 0.0143]	5.76	[1.05 0.05]	7.16
42	['PHV', 'Sr']	[210.82 64.84]	[1. 1.]	[5.68e-21 5.01e-11]	0.75	0.29	0.35	[0.079, 0.00053]	5.88	[0.89 0.29]	7.20
43	['RMS', 'freq of spectral max']	[49.49 1.06]	[1. 0.69]	[2.56e-09 0.306]	0.75	0.30	0.35	[0.0219, -0.122]	6.68	[1.08 -0.38]	7.20
44	['log10(PHV)', 'log10(Hausner Int)']	[263.71 37.95]	[1. 1.]	[3.04e-23 7.39e-08]	0.75	0.31	0.35	[3.12, 0.27]	3.49	[0.88 0.10]	7.16
45	['Fajfar', 'log10(PHV)']	[167.70 263.71]	[1. 1.]	[9.28e-19 3.04e-23]	0.74	0.31	0.35	[0.0122, 2.091]	4.55	[0.36 0.59]	7.13
46	['RMS', 'log10(Hausner Int)']	[49.49 37.95]	[1. 1.]	[2.56e-09 7.39e-08]	0.74	0.30	0.36	[0.0122, 1.82]	3.66	[0.60 0.70]	7.24
47	['log10(PHV)', 'log10(Arias Int)']	[263.71 217.62]	[1. 1.]	[3.04e-23 2.74e-21]	0.74	0.27	0.36	[1.58, 0.93]	2.78	[0.45 0.59]	7.23
48	['PHV', 'PHD']	[210.82 20.49]	[1. 1.]	[5.68e-21 3.03e-05]	0.74	0.30	0.36	[0.097, -0.0080]	5.87	[1.09 -0.057]	7.16
49	['PHV', 'log10(PHA)']	[210.82 80.54]	[1. 1.]	[5.68e-21 1.46e-12]	0.74	0.30	0.36	[0.0659, 1.115]	3.73	[0.74 0.34]	7.22
50	['log10(Fajfar)', 'log10(Spectral PHA)']	[144.56 146.74]	[1. 1.]	[2.18e-17 1.60e-17]	0.74	0.26	0.36	[1.68, 1.90]	1.62	[0.55 0.60]	7.18
51	['PHV', 'log10(Duration)']	[210.82 1.60]	[1. 0.79]	[5.68e-21 2.11e-01]	0.73	0.31	0.36	[0.092, 0.0208]	5.84	[1.04 0.01]	7.15
52	['PHV', 'log10(Fajfar)']	[210.82 144.55]	[1. 1.]	[5.68e-21 2.18e-17]	0.73	0.30	0.36	[0.062, 0.90]	5.04	[0.69 0.29]	7.13
53	['PHV', 'Ang Int']	[210.82 79.58]	[1. 1.]	[5.68e-21 1.79e-12]	0.73	0.31	0.36	[0.085, 2.51e-05]	5.92	[0.96 0.11]	7.15
54	['PHV', 'log10(Hausner Int)']	[210.82 37.95]	[1. 1.]	[5.68e-21 7.39e-08]	0.73	0.31	0.37	[0.0797, 0.464]	5.27	[0.90 0.18]	7.14
55	['PHV', 'Arias Int']	[210.82 56.53]	[1. 1.]	[5.68e-21 3.94e-10]	0.73	0.31	0.37	[0.088, 4.06e-06]	5.91	[0.99 0.06]	7.15
56	['log10(PHV)', 'log10(Tm)']	[263.71 9.28e-03]	[1. 0.08]	[3.04e-23 0.92]	0.72	0.33	0.37	[3.34, -0.74]	3.35	[0.95 -0.28]	7.19
57	['log10(PHV)', 'log10(freq of spectral max)']	[263.71 9.28e-03]	[1. 0.08]	[3.04e-23 0.92]	0.72	0.33	0.37	[3.34, 0.74]	3.35	[0.95 0.28]	7.19
58	['log10(Fajfar)', 'log10(Duration)']	[144.55]	[1. 0.79]	[2.18e-17 0.211]	0.72	0.30	0.37	[3.33, -1.03]	4.02	[1.09 -0.49]	7.18
59	['RMS', 'log10(f_{aw})']	[49.49 5.11e-03]	[1. 0.06]	[2.56e-09 0.94]	0.72	0.34	0.37	[0.0215, -1.55]	7.54	[1.06 -0.27]	7.23
60	['PHV', 'Sn']	[210.82 353.62]	[1. 0.15]	[5.67e-21 0.85e-01]	0.72	0.31	0.37	[0.092, -0.0049]	5.89	[1.04 -0.02]	7.14
61	['Sr', 'log10(PHV)']	[64.84 263.71]	[1. 1.]	[5.00e-11 3.04e-23]	0.72	0.34	0.37	[0.00069, 2.55]	4.24	[0.38 0.72]	7.19

	Parameters	F-test	f%	pi-value	R2	MAE	RMSE	Coeff	Intercept	Coeff norm	Intercept norm
62	['PHV', 'Hausner Int']	[210.82 10.049]	[1. 1.]	[5.68e-21 2.43e-03]	0.72	0.31	0.37	[0.0869, 0.00119]	5.86	[0.98 0.14]	7.15
63	['PHV', 'log10(Sn)']	[210.82 0.33]	[1. 0.43]	[5.68e-21 0.57e-01]	0.71	0.32	0.37	[0.092, -0.131]	5.97	[1.04 -0.03]	7.14
64	['Duration', 'log10(PHV)']	[0.69 263.71]	[0.59 1.]	[0.41 3.04e-23]	0.71	0.31	0.38	[-0.00186, 3.33]	3.78	[-0.075 0.94]	7.16
65	['PHV', 'Spectral PHA']	[210.82 105.69]	[1. 1.]	[5.68e-21 1.10e-14]	0.71	0.31	0.38	[0.0657, 0.00615]	5.88	[0.74 0.47]	7.20
66	['PHV', 'V_S']	[210.82 1.62]	[1. 0.79]	[5.68e-21 0.21]	0.71	0.31	0.38	[0.0923, -6.93e-05]	5.91	[1.04 -0.03]	7.14
67	['log10(PHV)', 'log10(Duration)']	[263.71 1.60]	[1. 0.79]	[3.04e-23 0.21]	0.71	0.30	0.38	[3.36, -0.22]	3.995	[0.95 -0.11]	7.17
68	['f_aw', 'log10(PHV)']	[14.85 263.71]	[0.3 1.]	[0.70 3.04e-23]	0.71	0.35	0.38	[0.05, 3.38]	3.27	[0.16 0.96]	7.18
69	['PHA', 'log10(Hausner Int)']	[82.76 37.95]	[1. 1.]	[9.17e-13 7.39e-08]	0.71	0.29	0.38	[0.00255, 1.2882]	4.37	[0.69 0.50]	7.18
70	['PHA', 'freq of spectral max']	[82.76 1.06]	[1. 0.69]	[9.17e-13 0.31e-01]	0.70	0.28	0.38	[0.0046, -0.151]	6.64	[1.25 -0.47]	7.24
71	['log10(PHV)', 'log10(Sr)']	[263.71 50.27]	[1. 1.]	[3.04e-23 2.1e-09]	0.70	0.33	0.38	[2.70, 0.76]	2.56	[0.76 0.32]	7.21
72	['PHV', '\$E_j\$']	[210.82 55.39]	[1. 1.]	[5.68e-21 5.29e-10]	0.70	0.32	0.38	[0.084, 2.7e-07]	5.94	[0.94 0.09]	7.1363
73	['RMS', '\$f_{aw}\$']	[49.49 0.15]	[1. 0.30]	[2.56e-09 0.70]	0.70	0.35	0.38	[0.021, -0.100]	6.99	[1.05 -0.32]	7.2097

$$I = 1.52 \cdot \log_{10}(\text{RMS}) + 2.04 \cdot \log_{10}(\text{Fajfar}) + 2.04, R^2 = 0.85, \text{MAE} = 0.22$$



$$I = 2.60 \cdot \log_{10}(\text{PHV}) + 0.55 \cdot \log_{10}(\text{CAV}) + 2.94, R^2 = 0.82, \text{MAE} = 0.22$$

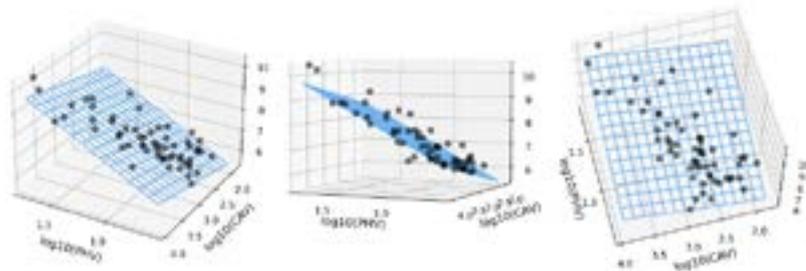


Рис. 6. Лучшие регрессионные модели для двух параметров по R^2 и MAE /

Fig. 6. The best regression models for two parameters by R^2 and MAE

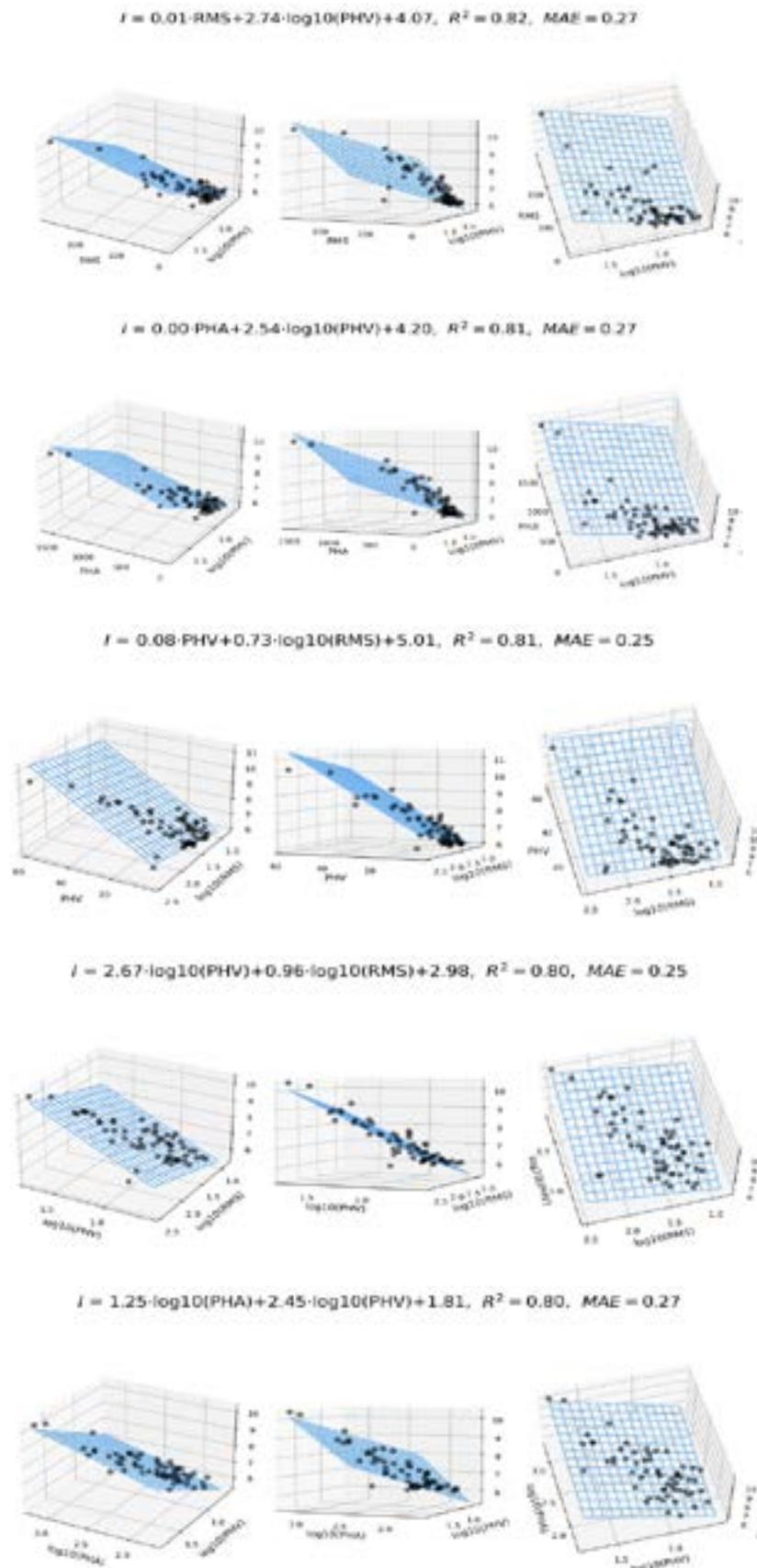
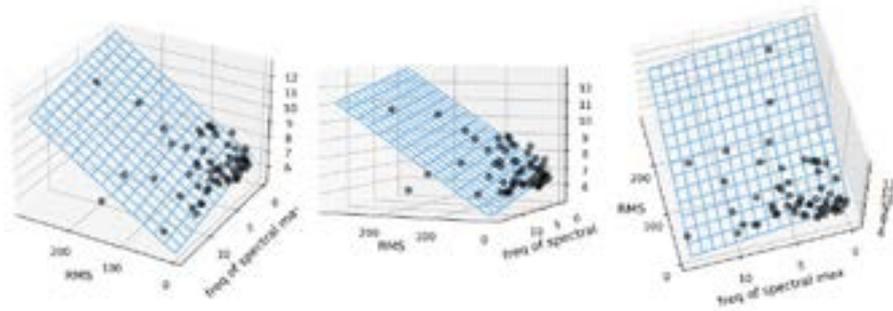
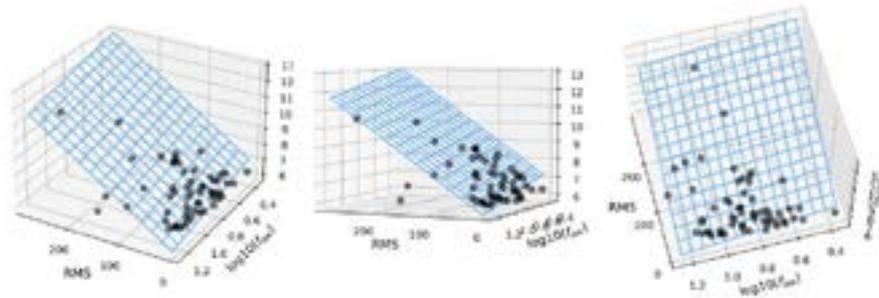


Рис. 7. Регрессионные модели, использующие значения скорости и ускорения /
 Fig. 7. Regression models using velocity and acceleration values

$$I = 0.02 \cdot \text{RMS} - 0.12 \cdot \text{freq of spectral max} + 6.67, R^2 = 0.75, \text{MAE} = 0.30$$



$$I = 0.02 \cdot \text{RMS} - 1.55 \cdot \log_{10}(f_{\text{max}}) + 7.54, R^2 = 0.72, \text{MAE} = 0.34$$



$$I = 1.78 \cdot \log_{10}(E) - 1.40 \cdot \log_{10}(\text{Duration}) + 1.30, R^2 = 0.67, \text{MAE} = 0.34$$

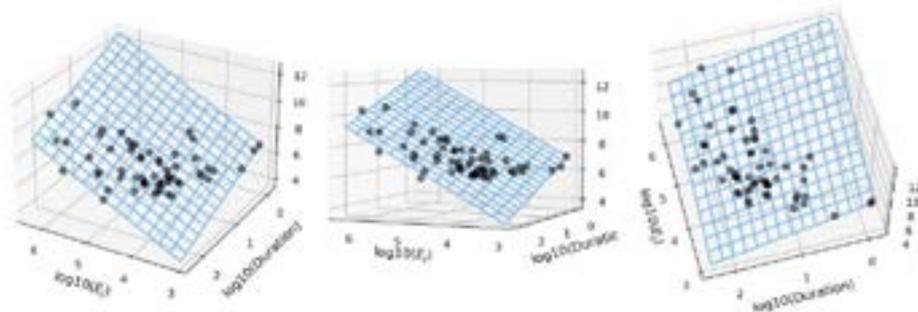


Рис. 8. Регрессионные модели, учитывающие спектральные особенности воздействия, продолжительность и полную выделяющуюся энергию /

Fig. 8. Regression models taking into account the spectral features of the impact, duration and total released energy.

Выводы

1. Для регрессионной модели с одним параметром наилучшие показатели метрик получены для пиковой горизонтальной скорости PGV: $R^2=0,76$; $\text{MAE}=0,29$. Физический смысл имеет квадрат скорости, пропорциональный энергии, при этом пиковые значения соответствуют максимальным кратковременным воздействиям,

т.е. энергии, которую система не может поглотить и рассеять в ограниченный промежуток времени.

2. Введением дополнительных параметров к скорости удается повысить R^2 до 0,85 (с кумулятивной абсолютной скоростью) и 0,8-0,82 с различными сочетаниями ускорений (рис. 7).

3. Наилучшие показатели достигаются для модели с комбинацией среднеквадратической скорости и меры Фаджфара. Учитывая, что мера Фаджфара представляет собой произведение пиковой скорости на корень четвертой степени из продолжительности воздействия новый параметр можно рассматривать как модифицированную меру Фаджфара: $PGV \cdot RMS^{3/4} \cdot Dur^{1/4}$.

4. Представляет интерес рассмотреть зависимости, полученные без участия пиковой скорости, и содержащие амплитудные и частотные характеристики: частоту спектрального максимума, среднеквадратическое ускорение и средневзвешенную частоту, энергию и продолжительность воздействия (рис. 8). Ускорения характеризуют силы, которые воздействуют на систему, на определенных преобладающих частотах. При этом согласно полученным закономерностям с увеличением преобладающей частоты интенсивность уменьшается. Аналогично с увеличением продолжительности (отрицательный коэффициент) происходит уменьшение интенсивности, т.е. вся энергия сигнала распределяется в более длительный промежуток времени и система успевает его поглощать без повреждений.

Литература

1. Аптикаев Ф.Ф. О картах ОСП в ускорениях. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №1. – С. 95–103. DOI: 10.46698/VNC.2021.24.94.008.
2. Габеева И.Л., Бурдзиева О.Г. Механизмы формирования интенсивности землетрясений в горных районах. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2008. – №3. – С. 53–56.
3. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок (учебное пособие). – М.: Наука, 2009. – 350 с.
4. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И. Взаимосвязь величины макро-сейсмической интенсивности с показателями инструментальных записей Гюбанского землетрясения 2000 г. и Тбилисских землетрясений 2002 г. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №1. – С. 89–108. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.23.007
5. Заалишвили В.Б., Харебов К.С., Харебов А.К. Создание баз данных сильных движений на основе современных воззрений. // Геология и геофизика Юга России. – 2013. – №3. – С. 39–44. DOI: 10.23671/VNC.2013.3.55537
6. Курбанов Х.Х., Лин Хонг, Сорокина Г.В., Уздин А.М. Характеристики сейсмического движения дневной поверхности. Их использование в сейсмостойком строительстве. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №3. – С. 34–60. DOI: 10.46698/VNC.2022.47.47.003.
7. Caprio M., Tarigan B., Worden C.B., Wiemer, S., Wald D.J. Ground motion to intensity conversion equations (GMICEs): A global relationship and evaluation of regional dependency. // Bull. Seismol. Soc. Am. – 2015. – Vol. 105. – pp. 1476–1490.
8. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. // Springer. – 2009. DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7
9. Karimzadeh S., Askan A. Collection of microseismic intensity data: a model for Turkey. // Arabian Journal of Geosciences. – 2021. – Vol. 14(5). – Article 396. DOI: 10.1007/s12517-021-06812-1

10. Kramer S.L. *Geotechnical Earthquake Engineering*, 1st ed. // Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA. – 1996. – pp. 65–84.
11. Koliopoulos P.K., Margaris B.N., Klimis N.S. Duration and energy characteristics of Greek strong motion records. // *Journal of Earthquake Engineering*. – 1998. – No.2:3. – pp. 391-417, DOI: 10.1080/13632469809350328
12. Masi A., Chiauzzi L., Nicodemo G., Manfredi V. Correlations between macroseismic intensity estimations and ground motion measures of seismic events. // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2020. – Vol. 18. – pp. 1-34. 10.1007/s10518-019-00782-2.
13. Musson R.M.W., Grünthal G., Stucchi M. The comparison of macroseismic intensity scales. // *J. Seismol.* – 2009. – Vol. 14. – pp. 413–428.
14. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. – 2019. DOI: 10.17598/NIED.0004
15. Smola A.J., Schölkopf B. A Tutorial on Support Vector Regression. // *Statistics and Computing archive*. – 2004. – Vol. 14. Iss. 3. – pp. 199-222.
16. Sokolov V., Furumura T., Comparative Analysis of Two Methods for Instrumental Intensity Estimations using the Database Accumulated during Recent Large Earthquakes in Japan. // *Earthquake Spectra*. – 2008. – Vol. 24(2). – p. 513. DOI: 10.1193/1.2923918
17. Trifunac M.D., Brady A.G. On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion. // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 1975. – Vol. 65. – pp. 139–162.
18. Wald D.J., Quitoriano V., Heaton T.H., Kanamori H. Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California. // *Earthq. Spectra*. – 1999. – Vol. 15. – pp. 557–564.
19. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Mel'kov D.A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of northern Caucasus. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014a. – Vol. 50(2). – pp. 263–272.
20. Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014b. – Vol. 50(5). – pp. 707–718.
21. Zaalishvili V., Mel'kov D., Kanukov A., Dzeranov B. Spectral-temporal features of seismic loadings on the basis of strong motion wavelet database. // *International Journal of GEOMATE*. – 2016. – Vol. 10(1). – pp. 1656–1661.
22. Zaalishvili V.B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O.G., Melkov D.A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. // *Geology and Geophysics of Russian South*. – 2020. – Vol. 10(3). – pp. 94–113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006.
23. Zhang Ming, Yu Zhang, Guangchun Zhou. Study on Instrumental Intensity Using Wenchuan Earthquake Records. // *Applied Mechanics and Materials*. – 2012. – Vol. 226-228. – pp. 2235-2239.

References

1. Aptikaev F.F. About OSR maps in accelerations. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 95–103. DOI: 10.46698/VNC.2021.24.94.008 (In Russ.)
2. Gabeeva I.L., Burdzieva O.G. Mechanisms of earthquake intensity formation in mountainous areas. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2008. No. 3. pp. 53–56. (In Russ.)
3. Zaalishvili V.B. Seismic microzonation of urban territories, settlements and large building sites. Moscow. Nauka, 2009. 350 p. (In Russ.)
4. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I. Correlation between the value of macroseismic intensity and the indicators of instrumental records of the Gouban earthquake of 2000 and the Tbilisi earthquakes of 2002. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 89–108. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.23.007 (In Russ.)
5. V. B. Zaalishvili, K. S. Kharebov, and A. K. Kharebov, Creation of databases of strong

movements based on modern views. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2013. No. 3. pp. 39–44. DOI: 10.23671/VNC.2013.3.55537 (In Russ.)

6. Kurbanov Kh.Kh., Lin Hong, Sorokina G.V., Uzdin A.M. Characteristics of the seismic movement of the day surface. Their use in earthquake-resistant construction. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2022. Vol. 12. No. 3. pp. 34–60. DOI: 10.46698/VNC.2022.47.47.003.

7. Caprio M., Tarigan B., Worden C.B., Wiemer, S., Wald D.J. Ground motion to intensity conversion equations (GMICES): A global relationship and evaluation of regional dependency. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2015. Vol. 105. pp. 1476–1490.

8. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning*. Springer. 2009. DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7

9. Karimzadeh S., Askan A. Collection of microseismic intensity data: a model for Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021. Vol. 14. Article 396. DOI: 10.1007/s12517-021-06812-1.

10. Kramer S.L. *Geotechnical Earthquake Engineering*, 1st ed. Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA. 1996. pp. 65–84.

11. Koliopoulos P.K., Margaritis B.N., Klimis N.S. Duration and energy characteristics of Greek strong motion records. *Journal of Earthquake Engineering*. 1998. No.2:3. pp. 391-417, DOI: 10.1080/13632469809350328.

12. Masi A., Chiauzzi L., Nicodemo G., Manfredi V. Correlations between macroseismic intensity estimations and ground motion measures of seismic events. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2020. Vol. 18. pp. 1-34. 10.1007/s10518-019-00782-2.

13. Musson R.M.W., Grünthal G., Stucchi M. The comparison of macroseismic intensity scales. *J. Seismol.* 2009. Vol. 14. pp. 413–428.

14. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. 2019. DOI:10.17598/NIED.0004

15. Smola A.J., Schölkopf B. A Tutorial on Support Vector Regression. *Statistics and Computing archive*. 2004. Vol. 14. Issue 3. pp. 199–222.

16. Sokolov V., Furumura T., Comparative Analysis of Two Methods for Instrumental Intensity Estimations using the Database Accumulated during Recent Large Earthquakes in Japan. *Earthquake Spectra*. 2008. Vol. 24. p. 513. DOI: 10.1193/1.2923918.

17. Trifunac M.D., Brady A.G. On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1975. Vol. 65. pp. 139–162.

18. Wald D.J., Quitoriano V., Heaton T.H., Kanamori H. Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California. *Earthq. Spectra*. 1999. Vol. 15. pp. 557–564.

19. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Mel'kov D.A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of northern Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014a. Vol. 50(2). pp. 263–272.

20. Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014b. Vol. 50(5). pp. 707–718.

21. Zaalishvili V., Mel'kov D., Kanukov A., Dzeranov B. Spectral-temporal features of seismic loadings on the basis of strong motion wavelet database. *International Journal of GEOMATE*. 2016. Vol. 10(1). pp. 1656–1661

22. Zaalishvili V.B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O.G., Melkov D.A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10(3). pp. 94–113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006.

23. Zhang Ming, Yu Zhang, Guangchun Zhou. Study on Instrumental Intensity Using Wenchuan Earthquake Records. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vol. 226-228. pp. 2235-2239.

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34:551.1(082)

DOI: [10.46698/VNC.2023.45.94.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.45.94.006)

Оригинальная статья

Сейсмотектоника южной части центрального сегмента Большого Кавказа

В.В. Стогний¹, Г.А. Стогний¹, 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: 25.01.2023, доработана: 20.02.2023, принята к публикации: 02.03.2023

Резюме: Актуальность работы. Зона Южного склона Центрального сегмента Большого Кавказа сейсмически очень активна, в последние десятилетия здесь произошло несколько сильных землетрясений, в связи с этим изучение ее сейсмотектоники с выделением наиболее активных сейсмогенерирующих структур актуально. **Цель работы** – изучение связи глубинных структур земной коры зоны Южного склона Центрального сегмента Большого Кавказа, выявленных по материалам анализа и синтеза геолого-геофизических материалов, с характером его сейсмичности, и обоснованием возможных геодинамических моделей его развития. **Методы исследования.** Методы и методика работы заключались в обобщении материалов по тектоническому строению, сейсмичности, GPS-геодинамике и особенностей фокальных механизмов землетрясений южной части Центрального сегмента Большого Кавказа с обоснованием сейсмотектонической модели его ключевых участков. **Результаты работы.** На основании проведенных исследований установлено, что основными сейсмогенерирующими структурами южной части Центрального сегмента Большого Кавказа являются Дзирульский и Кутаисский высокоплотные блоки консолидированной земной коры. Эти структуры при общем тренде тектонических напряжений северо-северо-восточного направления, связанном с движением в этом направлении Закавказской плиты, обусловили формирование полей тектонических напряжений локального уровня, ответственных за формирование очаговых зон землетрясений. Сейсмотектоническими структурами более высоких порядков являются также глубинные разломы, особенно разграничивающие реологически разнородные структуры, одним из которых является Онийский разлом, представляющий собой северо-западное ограничение Дзирульского блока. Выделены наиболее сейсмоактивные Амбролаурский и Ткибульский сейсмоактивные узлы, проявляющиеся как участки концентрации эпицентров землетрясений и расположенные соответственно западнее северо-западного угла Дзирульского блока и в восточной части Кутаисского блока, в пределах которых можно ожидать сильные землетрясения.

Ключевые слова: сейсмичность, GPS-геодинамика, сейсмотектоника, Большой Кавказ, землетрясение, консолидированная кора, тектонический блок.

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию Геофизического института Владикавказского научного центра Российской академии наук, код: FMSM-2022-0013.

Для цитирования: Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л. Сейсмотектоника южной части Центрального сегмента Большого Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(1): 76-96. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006.

GEOPHYSICS

DOI: [10.46698/VNC.2023.45.94.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.45.94.006)

Original paper

Seismotectonics of the southern part of the Greater Caucasus Central segment

V.V. Stogny ¹, G.A. Stogny ¹, N.L. Ponomareva ²

¹Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: stogny_vv@mail.ru;

²Seismic station "Makhachkala" FIC UGC RAS, 136 Akhundova Str., Makhachkala367010, Russian Federation

Received: 25.01.2023, revised: 20.02.2023, accepted: 02.03.2023

Abstract: Relevance. The zone of the southern slope of the Central segment of the Greater Caucasus is seismically very active; in recent decades, several strong earthquakes have occurred here; therefore, the study of its seismotectonics with the identification of the most active seismogenic structures is relevant. **Aim.** The purpose of the work is to study the relationship between the deep structures of the earth's crust in the zone of the southern slope of the Central segment of the Greater Caucasus, identified from the analysis and synthesis of geological and geophysical materials, with the nature of its seismicity, and substantiation of possible geodynamic models of its development. **Methods.** The methods and methodology of the work consisted in summarizing the materials on the tectonic structure, seismicity, GPS geodynamics and features of the focal mechanisms of earthquakes in the southern part of the Central segment of the Greater Caucasus with the substantiation of the seismotectonic model of its key areas. **Results:** On the basis of the conducted studies, it was established that the main seismogenic structures in the southern part of the Central segment of the Greater Caucasus are the Dzirulsky and Kutaisky high-density blocks of the consolidated earth's crust. These structures, along with the general trend of tectonic stresses of the north-northeast direction, associated with the movement of the Transcaucasian plate in this direction, determined the formation of local level tectonic stress fields responsible for the formation of earthquake source zones. Seismotectonic structures of higher orders are also deep faults, especially delimiting rheologically heterogeneous structures, one of which is the Oniisky fault, which is the northwestern boundary of the Dzirulsky block. The most seismically active Ambrolaursky and Tkibulsky seismically active nodes are identified, which manifest themselves as areas of concentration of earthquake epicenters and are located respectively to the west of the northwestern corner of the Dzirulsky block and in the eastern part of the Kutaisky block, within which strong earthquakes can be expected.

Keywords: seismicity, GPS geodynamics, seismotectonics, Greater Caucasus, earthquake, consolidated crust, tectonic block.

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

For citation: Stogny V.V., Stogny G.A., Ponomareva N.L. Seismotectonics of the southern part of the Greater Caucasus Central segment. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(1): 76-96. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006.

Введение

Зона Южного склона Центрального сегмента мегаантиклинория Большого Кавказа считалась практически асейсмичной до Рачинского землетрясения 29.04.1991 г., одного из сильнейших землетрясений XX века на Кавказе. В начале XXI века

в эпицентральной области Рачинского землетрясения произошли Онийское-I 06.02.2006 г. и Онийское-II 07.09.2009 г. землетрясения [Габсатарова и др., 2012; Габсатарова, 2015; Рогожин, 2017].

Геодинамические условия формирования Рачинского землетрясения 29.04.1991 г. рассмотрены в многочисленных публикациях, в том числе [Арефьев и др., 1993, 2006; Белоусов, 2009; Заалишвили, Бондырев, 2010; Рогожин и др., 1991; Fuenzalida et al., 1997; Triep et al., 1995]. В основе предлагаемых сеймотектонических моделей обычно заложен механизм поддвига Дзирульского массива Закавказского микроконтинента под южный склон Центрального Кавказа либо надвиг последнего на Закавказский микроконтинент [Адамия и др., 1989; Гамкрелидзе П., Гамкрелидзе И., 1977; Гиоргобиани, 2008; Рогожин и др., 2015]. Так в [Овсяченко и др., 2014; Tseng et al., 2016] охарактеризована серия надвигов, ответственных за землетрясения Рача-Джавской зоны. Роль тектонических нарушений в формировании очагов землетрясений в пределах Центрального сегмента и в целом по Большому Кавказу охарактеризована в [Gamkrelidze et al., 1998; Tibaldi et al., 2020; Triep et al., 1995].

В настоящее время территория южного склона Центрального Кавказа остается сейсмически активной, поэтому проблема анализа сейсмичности и условий ее реализации является актуальной [Zaalishvili et al., 2014]. Основой предложенной сеймотектонической модели формирования Рачинского и Онийских землетрясений Рача-Джавской зоны, а также современной сейсмичности зоны Южного склона Большого Кавказа является тектоническая схема консолидированной земной коры, разработанная по результатам интерпретации геолого-геофизических материалов.

Материалы и методы исследований

Анализ современной сейсмичности и геолого-геофизических материалов с целью разработки сеймотектонической модели Рача-Джавской сейсмической зоны южной части Центрального сегмента Большого Кавказа выполнен на площади, ограниченной $42,6-44,8^\circ$ в.д. и $42,0-43,2^\circ$ с.ш. (рис. 1).

В тектоническом отношении изучаемый район представлен зонами Главного хребта и Южного склона Центрального сегмента Большого Кавказа, а на юге Закавказским срединным массивом – палеомикроконтинентом [Тектоника ..., 2009]. Зона Главного хребта сложена протерозойскими метаморфическими породами и палеозойскими гранитами. Зона Южного склона сложена мезозойскими карбонатно-сланцевыми толщами Сванетского антиклинория, меловыми флишевыми отложениями Чиауро-Дибрарского синклинория, а также терригенными и вулканогенными толщами Гагро-Джавской зоны, ограниченной с юга Лечхумской шовной зоной, выраженной узкой Рача-Лечхумской грабен-синклиналью, выполненной отложениями верхней юры, мела и палеогена. Гагро-Джавская зона надвинута на сложенную породами юры и мела Окрибо-Сачхерскую зону, частично перекрывающую Дзирульский кристаллический массив Закавказской плиты.

В качестве основной информации при разработке схемы строения консолидированной земной коры служили результаты интерпретации гравитационного поля и данные по профилю ГСЗ Степное-Бакуриани [Павленкова, 2012].

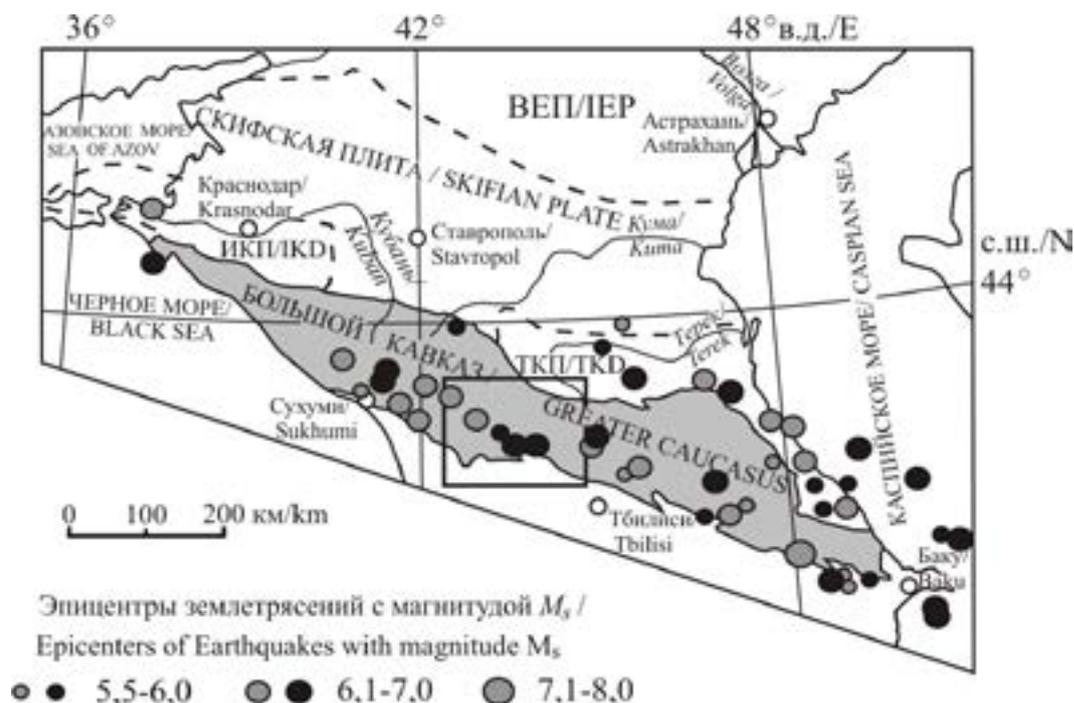


Рис. 1. Обзорная схема Черноморско-Каспийского региона: прямоугольник – район исследования. Буквами обозначены тектонические структуры разного порядка: ВЕП – Восточно-Европейская платформа, ИКП – Индоло-Кубанский прогиб, ТКП – Терско-Каспийский прогиб. Эпицентры сильных землетрясений Большого Кавказа по [Tibaldi et al., 2020 (серые – исторические, черные – инструментальные) /

Fig. 1. Overview scheme of the Black Sea-Caspian region: rectangle – study area. Letters designate tectonic structures of different orders: IEP, East European Platform; ICD, Indolo-Kuban depression; TKD, Terek-Caspian depression. Epicenters of strong earthquakes in the Greater Caucasus according to [Tibaldi et al., 2020] (grey – historical, black – instrumental).

При обосновании геодинамической модели движения блоков земной коры изучаемого района использованы материалы горизонтальных смещений GPS-пунктов, проведенные в период 1991–1997 гг., соответствующий Рачинскому землетрясению (29.04.1991) и его афтершоковому процессу [Шевченко и др., 1999], и в 2010–2013 годах после землетрясения Онийское-II (07.09.2009) [Шевченко и др., 2016, 2017]. Оценка скоростей и направлений движений пунктов GPS-наблюдений периода 1991–1997 гг. осуществлялась в местной системе координат относительно опорной геодезической станции «Зеленчук» (ZELB), которая расположена в пределах довольно стабильной Лабино-Малкинской зоны, а периода 2010–2013 гг. – относительно опорной геодезической станции «Ардон» (ARDN), располагающейся в стабильной приосевой части Бесланского прогиба Предкавказья. Данные GPS-наблюдений широко применяются не только для решения задач геодинамики на глобальном и региональном уровнях, но и на локальном уровне, при решении специальных задач сейсмологии [Srijayanthi et al., 2020; Yadav et al., 2017].

Анализ сейсмичности Рача-Джавской зоны объединяющей сильные землетрясения 1991–2009 годов, в том числе Рачинское и Онийские, приведен по литературным данным, а исследуемого района за период 2011–2021 гг. по материалам каталогов ФИЦ ЕГС РАН.

Сейсмичность южного склона Центрального сегмента

В пределах района исследования известны исторические Лечхуми-Сванетское землетрясение 1350 г. и Лабаскаиди-Церийское землетрясение 1750 г. (рис. 2), магнитуда которых оценивается соответственно 7,0 и 6,9 [Varazanashvili et al., 2011]. В голоцене по [Овсюченко и др., 2014] произошли две крупномасштабные активизации: среднеголоценовая активизация, продолжительность которой оценена в 2300 лет (7300–5000 лет назад) и позднеголоценовая активизация продолжительностью около 1600 лет, включающая Рачинское землетрясение 1991 г.

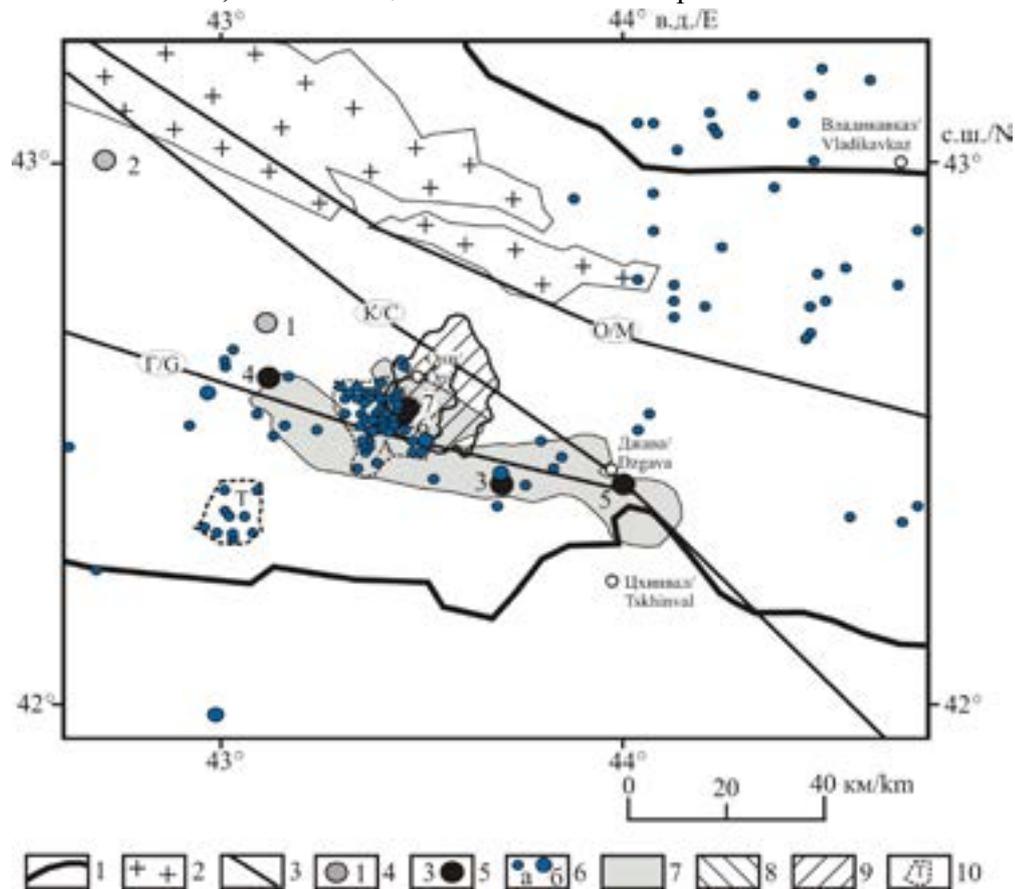


Рис. 2. Сейсмичность изучаемого района Центрального сегмента Большого Кавказа.

1 – границы мегаантиклинория Большого Кавказа; 2 – выходы раннедокембрийских метаморфических пород и палеозойских гранитов по [Геологическая ..., 1978]; 3 – тектонические нарушения по [Gamkrelidze et al., 1998]; О – Главный разлом, Г – Гагра-Джавский разлом, К – Кавказский фронтальный надвиг; 4–5 – сильные землетрясения: 4 – исторические (1 – Лечхуми-Сванетское, 1350 г.; 2 – Лабаскаиди-Церийское, 1750 г.), 5 – инструментальные (3 – Рачинское, 29.04.1991 по каталогу ISC, 4 – афтершок Рачинского землетрясения, 03.05.1991 по данным MOS, 5 – Джавское (Рачинское-II), 15.06.1991, 6 – Онийское-I, 06.02.2006, 7 – Онийское-II, 07.09.2009); 6 – эпицентры землетрясений за 2011–2021 гг. по данным каталогов ФИЦ ЕГС РАН: а – с $2,5 \leq M_S < 4,0$, б – с $M_S \geq 4,0$; 7–9 – эпицентральные области: 7 – Рачинского землетрясения 29.04.1991 г. по [Арефьев и др., 1993]; 8 – землетрясения Онийское-I по [Габсатарова и др., 2012]; 9 – землетрясения Онийское-II по [Габсатарова, 2015]; 10 – сейсмоактивные узлы за период 2011–2021 гг.: А – Амбролаурский, Т – Ткибульский /

Fig. 2. Seismicity of the study area of the Greater Caucasus Central segment.

1 – boundaries of the megaanticlinorium of the Greater Caucasus; 2 – outcrops of Early Precambrian metamorphic rocks and Paleozoic granites after [Geological ..., 1978]; 3 – tectonic faults after [Gamkrelidze et al., 1998]; М – Main fault, G – Gagra-Dzhava fault, C – Caucasian frontal thrust;

4–5 – strong earthquakes: 4 – historical (1 – Lechkhumi-Svanetskoe, 1350; 2 – Labaskaidi-Tseriiskoe, 1750), 5 – instrumental (3 – Rachinskoe, 04.29.1991 according to the ISC catalog, 4 – aftershock Racha earthquake, May 3, 1991 according to MOS data, 5 – Dzhavskoe (Racha II), June 15, 1991, 6 – Oniy I, February 6, 2006, 7 – Oniy II, September 7, 2009); 6 – earthquake epicenters for 2011–2021 years according to the catalogs of the FRC EGS RAS: a – for $2.5 \leq M_S < 4.0$, b – for $M_S \geq 4.0$; 7–9 – epicentral areas: 7 – Racha earthquake of April 29, 1991 after [Arefiev et al., 1993]; 8 – Oniy I earthquake after [Gabsatarova et al., 2012]; 9 – Oniy II earthquake after [Gabsatarova, 2015]; 10 – seismically active nodes for the period 2011–2021 years: A – Ambrolaursky, T – Tkibulsky.

Рачинское (Рача-Джавское по [Папалашвили и др., 1997] землетрясение произошло 29.04.1991 г. в 09:12:48,1 (час:мин:сек) и является одним из наиболее сильных из зарегистрированных на Кавказе в инструментальный период, его магнитуда $M_S=7,0$, а глубина гипоцентра по разным данным оценивалась от 5 до 17 км, землетрясение сопровождалось большим числом афтершоков, только в первой декаде мая 1991 г. их было зарегистрировано около 2,5 тыс.

Эпицентральная область Рачинского землетрясения протяженностью до 100 км при ширине 10–20 км простирается преимущественно вдоль Гагра-Джавского (по [Gamkrelidze et al., 1998]) разлома. В период 1991–1994 гг. было зарегистрировано 33 афтершока Рачинского землетрясения с $M_S > 4,5$, из которых 20 афтершоков произошло в день основного события, четыре из них имели магнитуду $M_S > 5,0$, а одно (29.04.1991 г. в 18:30:41,5) – $M_S=6,1$. На северо-западном фланге области вблизи г. Амбролаури 3 мая 1991 г. зарегистрирован сильный афтершок с магнитудой $M_S=5,3$ и глубиной гипоцентра 5 км, а на ее юго-восточном фланге вблизи г. Джава 15 июня 1991 г. – сейсмическое событие с магнитудой $M_S=6,2$ и глубиной гипоцентра $h=5$ км, считавшееся первоначально сильным афтершоком Рачинского землетрясения, а в последующем – самостоятельным землетрясением Рачинское-II (соответственно, основной толчок стал обозначаться Рачинское-I). Крупные сейсмические события на северо-западном и юго-восточном флангах эпицентральной области сформировали, по-видимому, собственные узлы концентрации эпицентров овальной формы. В центральной части области субпараллельно его основной ветви сформировалась северная ветвь концентрации эпицентров землетрясений.

Следующее сильное сейсмическое событие Онийское-1 произошло 6 февраля 2006 г., эпицентр его находился в пределах северной ветви Рачинской эпицентральной области вблизи г. Они [Габсатарова и др., 2012]. Магнитуда этого землетрясения по данным сети Северного Кавказа ГС РАН (NC) $M_S=5,0$, при глубине гипоцентра $h=12$ км (по данным других центров, TIF, MOS, HRVD, CSEM, глубина гипоцентра Онийского землетрясения определена в интервале $h=10–14$ км, два центра дали значения $h=17.7 \pm 8$ км (NEIC) и $h=24 \pm 1$ км (ISC)). Онийское землетрясение сопровождалось серией из 600 афтершоков, зарегистрированных сейсмической сетью Северо-Осетинского филиала ГС РАН. Эпицентральная область Онийского (06.02.2006 г.) землетрясения вынесена на рис. 2. Сейсмическая активность в данном районе отмечена также в мае 1971 г., когда было зарегистрировано три землетрясения с $M=4,0$, интенсивность сотрясений которых в г. Они оценивалась в 5–6 баллов по шкале MSK-64.

Землетрясение с магнитудой $M_S=5,8$, которое произошло 7 сентября 2009 г. (по каталогу ISC магнитуда этого землетрясения M_S оценивается в 5,7, а по данным [Zare et al., 2014] в $M_S=6,0$, $M_W=6,3$) получило название Онийское-II (соответственно землетрясение 06.02.2006 г. стало называться Онийское-I), его эпицентр располагался в нескольких километрах северо-восточнее эпицентра землетрясения Онийское-I, примерно в 10 км южнее г. Они. Детальное описание этого землетрясения дано в

[Габсатарова, 2015]. Глубина гипоцентра по данным центра NC сети Северного Кавказа ГС РАН оценена в 12 км, по данным других центров (TIF, MOS, ISC, NEIC, HRVD, IDC, CSEM) – в интервале 8–15 км.

Землетрясение Онийское-II сопровождалось большой последовательностью афтершоков, которых было зарегистрировано 1167, в их числе в первые сутки после основного толчка – 415, в последующие 2–5 суток – 256 афтершоков [Габсатарова, 2015], контуры области концентрации эпицентров афтершоков этого землетрясения вынесены на рис. 2. Отметим, что границы области концентрации эпицентров афтершоков землетрясения Онийское-II значительно (до 10–12 км) расширились преимущественно в восточном и северо-северо-восточном направлении по сравнению с контурами области концентрации эпицентров афтершоков землетрясения Онийское-I, вытянутость этой области также соответствует северо-северо-восточному направлению. Облако концентраций эпицентров Онинских землетрясений 2009 г. смещено к северу от Рачинской сейсмической зоны на 10–30 км, а глубина их реализации сместилась с 3–10 км, характерных для Рачинской зоны, в интервал 10–20 км [Tseng et al., 2016].

Таблица 1 / Table 1

Количество зарегистрированных землетрясений района исследований за период 2001–2021 гг. по каталогам ФИЦ ЕГС РАН. / The number of recorded earthquakes of the study area for the period 2001–2021 years according to the catalogs of the FIC UGC RAS

№ / №	Год / Year	Количество землетрясений / Number of earthquakes			
		Всего / Total	В том числе с магнитудой M_S / Including with magnitude M_S		
			$2,5 < M_S \leq 3,5$	$3,5 < M_S \leq 4,5$	$M_S > 4,5$
1.	2001	54	18	1	–
2.	2002	59	4	–	–
3.	2003	68	8	2	–
4.	2004	147	13	2	–
5.	2005	461	8	–	–
6.	2006	835	36	2	1
7.	2007	375	8	1	–
8.	2008	230	18	1	–
9.	2009	1283	77	2	2
10.	2010	304	20	1	–
11.	2011	321	14	3	1
12.	2012	223	8	1	–
13.	2013	233	10	–	–
14.	2014	197	10	–	–
15.	2015	229	13	1	–
16.	2016	176	9	–	–
17.	2017	147	7	1	–
18.	2018	143	8	–	1
19.	2019	130	9	1	–
20.	2020	177	8	3	–
21.	2021	362	13	2	–

В таблице 1 приведены данные по общему числу зарегистрированных землетрясений за период 2001–2021 гг. и землетрясений с магнитудой: $2,5 < M_S \leq 3,5$; $3,5 < M_S \leq 4,5$; $M_S > 4,5$. В рассмотренном промежутке времени сейсмическая активность начала возрастать с 2004 г., достигнув максимума в 2006 г., когда произошло землетрясение Онийское-I и было зарегистрировано 835 землетрясений, в том числе с магнитудой в интервале 2,5–3,5 – 36, два землетрясения с магнитудой $M_S = 4,5$ и одно землетрясение имело магнитуду $M_S = 5,1$. Наибольший всплеск сейсмической активности приходится на 2009 г., связанный с землетрясением Онийское-II, когда было зарегистрировано 1383 землетрясения, в том числе с магнитудой в интервале 2,5–3,5 – 71, в интервале 3,5–4,5 – 8, и с магнитудой более 4,5 – 2 землетрясения. В период 2010–2019 гг. сейсмическая активность постепенно уменьшается, но с 2020 г. начинает возрастать и резко возросла 2021 г., примерно в два раза по сравнению с предыдущими годами. Эпицентры землетрясений за десятилетний период (2011–2020 гг.) с $2,5 \leq M_S < 4,0$ и $M_S \geq 4,0$ (наибольшая магнитуда из зарегистрированных в этот период – $M_S = 4,7$) вынесены на рис. 2.

В северо-восточной части Центрального сегмента, в его Северо-Осетинском секторе [Горбатикив и др., 2015], расположенном севернее Главного разлома, отмечается повышенная сейсмическая активность, но тенденция к значительной концентрации эпицентров землетрясений в определенных локальных областях не замечена [Стогний и др., 2015].

Наиболее ярко в период 2011–2021 гг. сейсмическая активность проявилась на ограниченной площади (42,4–42,6° с.ш., 43,3–43,5° в.д.), расположенной западнее эпицентральной области землетрясения Онийское-I, в пределах которой за этот промежуток времени по данным каталогов ФИЦ ЕГС РАН зарегистрировано 387 землетрясений, в том числе с магнитудой $M_S \geq 2,5$ – 58 землетрясений. На данной площади выделен Амбролаурский сейсмоактивный узел, в котором отмечается резкое увеличение сейсмической активности в 2020–2021 гг. Вторая локальная площадь с высокой концентрацией эпицентров землетрясений расположена юго-западнее Амбролаурского сейсмоактивного узла (42,25–42,45° с.ш., 42,9–43,1° в.д.), где за период 2011–2021 гг. по данным центра НС было зарегистрировано 43 землетрясения, 10 из которых имели магнитуду $M_S \geq 2,5$, в ее пределах выделен Ткибульский сейсмоактивный узел.

Сеймотектоническая модель Рача-Джавской зоны

Основой предложенной сеймотектонической модели Рача-Джавской зоны является схема блокового строения консолидированной земной коры Северо-Западного и Центрального сегментов мегаантиклинория Большого Кавказа, разработанная по результатам анализа геолого-геофизических материалов (рис. 3). Тектоническое строение консолидированной коры Северо-Западного сегмента и зоны Южного склона Центрального сегмента определяют выделенные по локальным гравитационным максимумам Анапский, Сочинский, Гагрынский, Кутаисский и Дзирульский высокоплотные блоки [Стогний Г., Стогний В., 2017], амплитуда гравитационных максимумов которых оценивается до 20–30 мГал, а их размеры по длинной оси составляют в среднем 60 км.

Дзирульский блок консолидированной коры выделен в контурах Цхинвальского гравитационного максимума амплитудой более 25 мГал, южная часть которого в плане соответствует Дзирульскому кристаллическому массиву, сложенному про-

терозойскими метаморфическими породами и палеозой-мезозойскими гранитоидами [Стогний В., Стогний Г., 2022]. Северная часть Дзирульского блока перекрыта мезозойским осадочным комплексом зоны Южного склона Большого Кавказа. Блок ориентирован практически ортогонально по отношению к осевой зоне Большого Кавказа, а ограничивающий его Онийский глубинный разлом на поверхности выражен северо-западным окончанием Кахетино-Вандамской шовной зоны и далее в юго-восточном направлении – южным крылом Чиауро-Дибрарского синклинория.

Глубинное строение Дзирульского высокоплотного блока характеризуют материалы профиля ГСЗ Степное-Бакуриани на отрезке Хашури-Джава. По материалам скоростного разреза профиля ГСЗ Степное-Бакуриани, полученного по результатам переинтерпретации первичных данных [Павленкова, 2012], на отрезке Хашури-Джава выделен высокоскоростной фрагмент верхней части земной коры (скорость продольных волн 7,1–7,3 км/с) протяженностью по профилю до 80 км. Верхняя его южная кромка находится на глубине около 1 км, а северная опущена на 5 км, глубина нижней кромки уменьшается с 20 до 15 км в северном направлении. Г.А. Павленкова [2012] данный высокоскоростной фрагмент интерпретирует как интрузивное тело. В нашей интерпретации высокоскоростной фрагмент верхней части земной коры сейсмического разреза ГСЗ отражает Дзирульский высокоплотный блок консолидированной коры Закавказской плиты. Высокоскоростной разрез земной коры зоны Южного склона Центрального сегмента показан также в материалах профиля ММЗ [Рогожин и др., 2015].

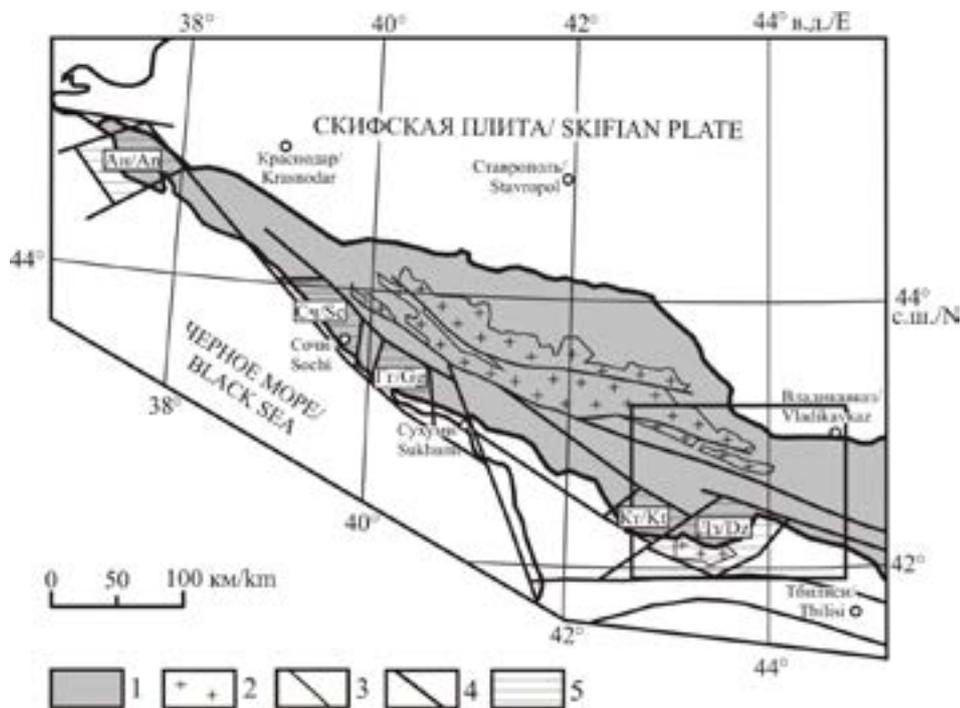


Рис. 3. Тектоническое строение консолидированной коры Северо-Западного сегмента и зоны Южного склона Центрального сегмента Большого Кавказа по результатам интерпретации геолого-геофизических материалов: прямоугольник – район исследования.

1 – контур мегаантиклинория Большого Кавказа по [Геологическая ..., 1992]; 2 – выходы протерозойских метаморфических пород и палеозойских гранитов Центрального сегмента и Дзирульского массива по [Геологическая ..., 1992]; 3–4 – разломы: 3 – по геологическим данным [Геологическая ..., 1992], 4 – по анализу гравитационного поля; 5 – высокоплотные блоки: Ан – Анапский, Сч – Сочинский, Гг – Гагринский, Кт – Кутаисский, Дз – Дзирульский /

Fig. 3. Tectonic structure of the consolidated crust of the Northwestern segment and the zone of the Southern slope of the Central segment of the Greater Caucasus according to the results of the geological and geophysical materials interpretation: a rectangle is the study area. 1 – outline of the Greater Caucasus megaanticlinorium after [Geological ..., 1992]; 2 – outcrops of Proterozoic metamorphic rocks and Paleozoic granites of the Central segment and the Dzirulsky massif after [Geological ..., 1992]; 3–4 – faults: 3 – according to geological data [Geological ..., 1992], 4 – according to the analysis of the gravitational field; 5 – high-density blocks: An – Anapsky, Sc – Sochinsky, Gg – Gagrynsky, Kt – Kutaissky, Dz – Dzirulsky.

Дзирульский блок продолжается под мезозойскими отложениями зоны Южного склона Большого Кавказа более чем на 40 км при глубине его подошвы до 20 км, ограничивающий его Онийский разлом фиксирует южный борт мезозойского прогиба мегаантиклинория.

Для оценки кинематики Дзирульского блока консолидированной коры проведен анализ имеющихся материалов по горизонтальным смещениям геодезических пунктов GPS-наблюдений [Лукк, Шевченко, 2019], простираения главных осей сжатия фокальных механизмов землетрясений [Лукк, Шевченко, 2019; Tseng et al., 2016], а также направлений перемещения сейсмотектонических блоков земной коры после Рачинского землетрясения [Белоусов, 2009] (рис. 4).

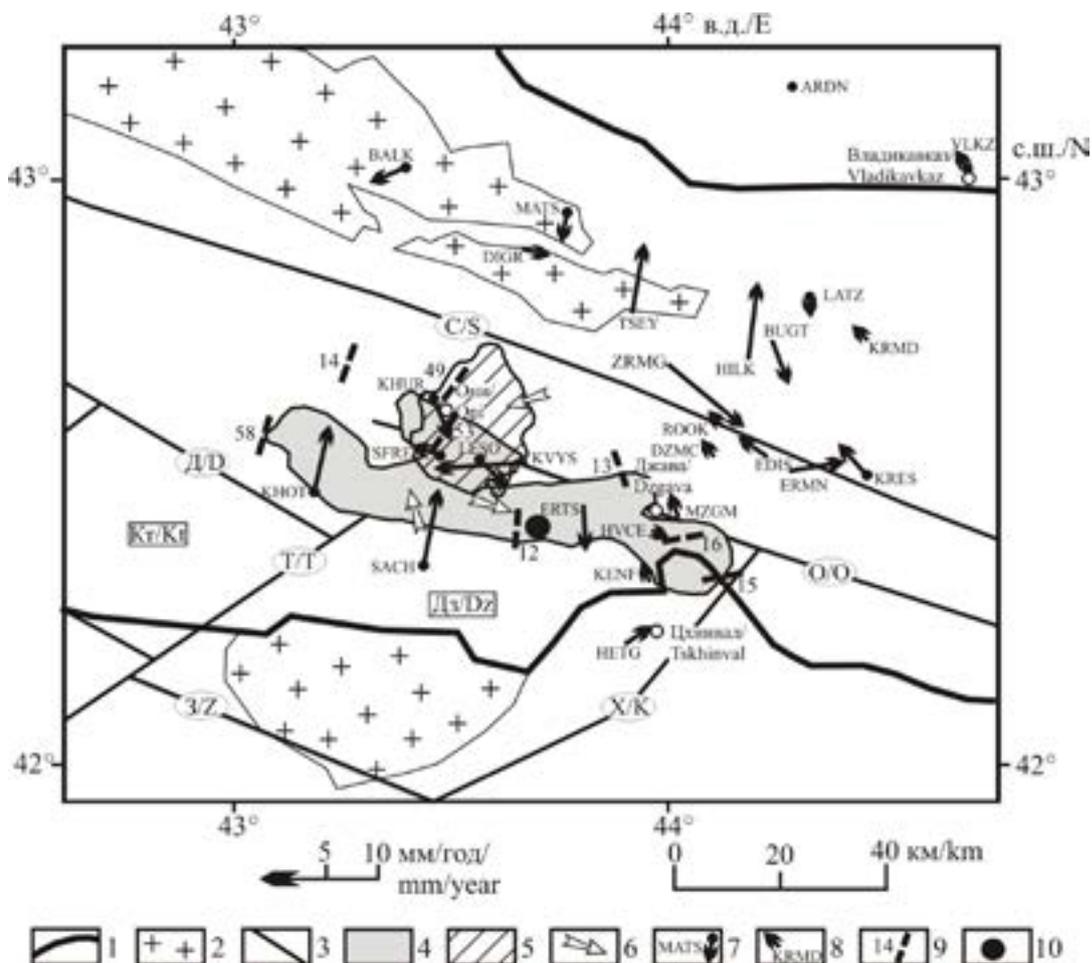


Рис. 4. Схема строения консолидированной коры района исследования по результатам интерпретации гравитационного поля [Гравиметрическая ..., 1990]. 1 – границы мегаантиклинория Большого Кавказа по [Геологическая ..., 1978]; 2 – выходы

протерозойских метаморфических пород и палеозойских гранитов Центрального сегмента Большого Кавказа и Дзирульского массива Закавказской плиты; 3 – глубинные разломы консолидированной коры: С – Сването-Алазанский, З – Зестафонский, О – Онийский, Д – Диагональный, Т – Тержольский, Х – Хашурский; 4–5 – эпицентральные области землетрясений: 4 – Рачинского 29.04.1991 г. по [Арефьев и др., 1993], 5 – Онийского-II 07.09.2009 г. по [Габсатарова, 2015]; 6 – направление горизонтального перемещения сеймотектонических блоков во время Рачинского землетрясения по [Белоусов, 2009]; 7–8 – векторы скоростей горизонтальных смещений пунктов GPS-наблюдений и их кодовые названия по [Лукк, Шевченко, 2019]: 7 – за 1991–1997 гг. относительно опорной геодезической станции ZELB, 8 – за 2010–2013 гг. относительно опорной геодезической станции ARDN; 9 – простирание главных осей сжатия фокальных механизмов землетрясений и их номера по [Лукк, Шевченко, 2019]; 10 – эпицентр Рачинского землетрясения (29.04.1991 г.). Буквами обозначены высокоплотные блоки консолидированной коры: Дз – Дзирульский, Кт – Кутаисский /

Fig. 4. Scheme of the structure of the study area consolidated crust based on the results of the gravitational field interpretation [Gravimetric ..., 1990]. 1 – boundaries of the megaanticlinorium of the Greater Caucasus according to [Geological ..., 1978]; 2 – outcrops of Proterozoic metamorphic rocks and Paleozoic granites of the Greater Caucasus Central segment and the Dzirulsky massif of the Transcaucasian Plate; 3 – deep faults of the consolidated crust: S – Svaneto-Alazansky, Z – Zestafonsky, O – Oniisky, D – Diagonalny, T – Terzholsky, K – Khashursky; 4–5 – epicentral regions of earthquakes: 4 – Racha earthquake on April 29, 1991 after [Arefiev et al., 1993], 5 – Oniy II earthquake on September 7, 2009 after [Gabsatarova, 2015]; 6 – direction of horizontal movement of seismotectonic blocks during the Racha earthquake according to [Belousov, 2009]; 7–8 – velocity vectors of horizontal displacements of GPS observation points and their code names according to [Lukk, Shevchenko, 2019]: 7 – for 1991–1997 relative to the ZELB reference geodetic station, 8 – for 2010–2013 relative to the ARDN reference geodetic station; 9 – strike of the main compression axes of earthquake focal mechanisms and their numbers according to [Lukk, Shevchenko, 2019]; 10 – epicenter of the Racha earthquake (April 29, 1991). Letters designate high-density blocks of the consolidated crust: Dz – Dzirulsky, Kt – Kutaisky.

Расположенные в северной части Дзирульского блока GPS-пункты ERTS, HVCE, KENF, MZGM имеют различные направления векторов скорости смещения (ERTS южное, HVCE юго-восточное, KENF и MZGM северо-северо-западное), а пункт HETG восточной части блока – северо-восточное, параллельное Хашурскому разлому. Скорости всех этих пунктов относительно станции GPS ARDN не превышают нескольких мм/год. GPS-пункты KNUR, LESO и SFRE северо-западного угла Дзирульского блока имеют следующие направления и величину векторов скорости смещения относительно станции ZELB: KNUR и LESO (соответственно 3,73 и 2,20 мм/год) – юго-восточное, SFRE – северо-северо-западное, а KVYS (7,05 мм/год) западное относительно станции ARDN.

В зоне Сването-Алазанского разлома векторы скоростей GPS-пунктов ROOK, DZMC, EDIS (скорости соответственно 0,93, 1,03 и 2,76 мм/год относительно станции ARDN) и станции KRES (3,53 мм/год относительно станции ZELB) имеют северо-западное направление, согласное с направлением простирания разлома, пункт ERMN (4,39 мм/год относительно станции ARDN) – субширотное восточное.

GPS-пункты KHOT и SACH (скорости соответственно 4,80 и 5,35 мм/год относительно станции ZELB) как и расположенные южнее площади исследования GPS-пункты NINO и NICH (скорости соответственно 4,3 и 6,0 мм/год) имеют северо-северо-восточное направление совпадающее с общим трендом направлений векторов скорости GPS южного склона Центрального и Восточного Кавказа [Reilinger et al., 2006].

Простираие главных осей сжатия фокальных механизмов землетрясений изучаемой территории и их номера вынесены на схему рис. 4 согласно [Лукк, Шевченко, 2019], приведенным из бюллетеня ISC. По отношению к Дзирульскому блоку их простираие различно для его северо-западного и юго-восточных углов, для первого характерно северо-северо-восточное простираие, а для второго – восточное.

Для главных осей сжатия фокальных механизмов 12–16 они соответствуют Рачинскому землетрясению и его афтершокам: 12 – Рачинское землетрясение ($m_b=6,2$, 29.04.1991); 13 – афтершок ($m_b=6,2$, 29.04.1991), который произошел в день основного толчка; 14 – афтершок ($m_b=5,3$, 03.05.1991); 15 – Рачинское-II ($m_b=6,1$, 15.06.1991); 16 – афтершок ($m_b=5,0$, 04.07.1991). Для главных осей сжатия фокальных механизмов 49, 53, 58 они соответствуют: 49 – землетрясение Онийское-I ($m_b=5,2$, 06.02.2006); 53 – землетрясение Онийское-II ($m_b=6,0$, 07.09.2009); 58 – афтершок ($m_b=5,0$, 18.08.2011).

Для гипоцентров землетрясений 12–16 и их главных осей сжатия фокальных механизмов приводятся следующие значения: 12 – (Рачинское 29.04.1991), глубина гипоцентра $h=17$ км, направление простираия главной оси сжатия $A=186^\circ$, а афтершоки 1991 г. соответствуют значениям: $h=10$ км, $A=161^\circ$ (13); $h=1$ км, $A=200^\circ$ (14); $h=9$ км, $A=79^\circ$ (15); $h=12$ км, $A=82^\circ$ (16), при их угле наклона α главной оси тензора СМТ, изменяющейся в пределах 4–10°. Для землетрясений 49 (Онийское-I, 06.02.2006) и 53 (Онийское-II, 07.09.2009) приведены значения соответственно $h=23$ км, $A=214^\circ$, $\alpha=16^\circ$ (49) и $h=15$ км, $A=212^\circ$, $\alpha=17^\circ$ (53), по характеру фокальных механизмов землетрясения Онийское-I и Онийское-II близки. Для всех землетрясений изучаемой территории характерны субгоризонтальные оси сжатия при небольших значениях угла α , соответствующих северному–северо-северо-восточному тренду, исключение составляют лишь землетрясения 15 и 16, направления осей сжатия которых (при A равном 79° и 82° соответственно) ортогональны основному направлению и развернуты в направлении простираия Онийского разлома, в зоне которого они находятся. По [Tseng et al., 2016] тренд максимальных сжимающих напряжений изменяется в интервале от -2 до 14° с.ш.

Непосредственно после Рачинского землетрясения в полевых условиях были выполнены измерения направлений перемещения сеймотектонических блоков земной коры [Белоусов, 2009] и по результатам этих измерений сделан вывод, что обобщенное горизонтальное перемещение сеймотектонических блоков Гагро-Джавской зоны происходило в западном-юго-западном направлении, Рача-Лечхумской – в восточном-юго-восточном, а Окрибо-Сачхерской – в северо-северо-западном.

Результаты работы и их обсуждение

Обобщающая схема геодинамики Дзирульского блока консолидированной коры по анализу векторов скоростей горизонтальных смещений пунктов GPS-наблюдений и простираия главных осей сжатия фокальных механизмов землетрясений приведена на рисунке 5. Учитывая превалирующие направления главных осей сжатия фокальных механизмов землетрясений, на схеме показано направление локального тренда тектонических напряжений Рача-Джавской сейсмогенной зоны, ортогональное к направлению главных осей сжатия и субпараллельное вектору скорости GPS-пункта KVYS.

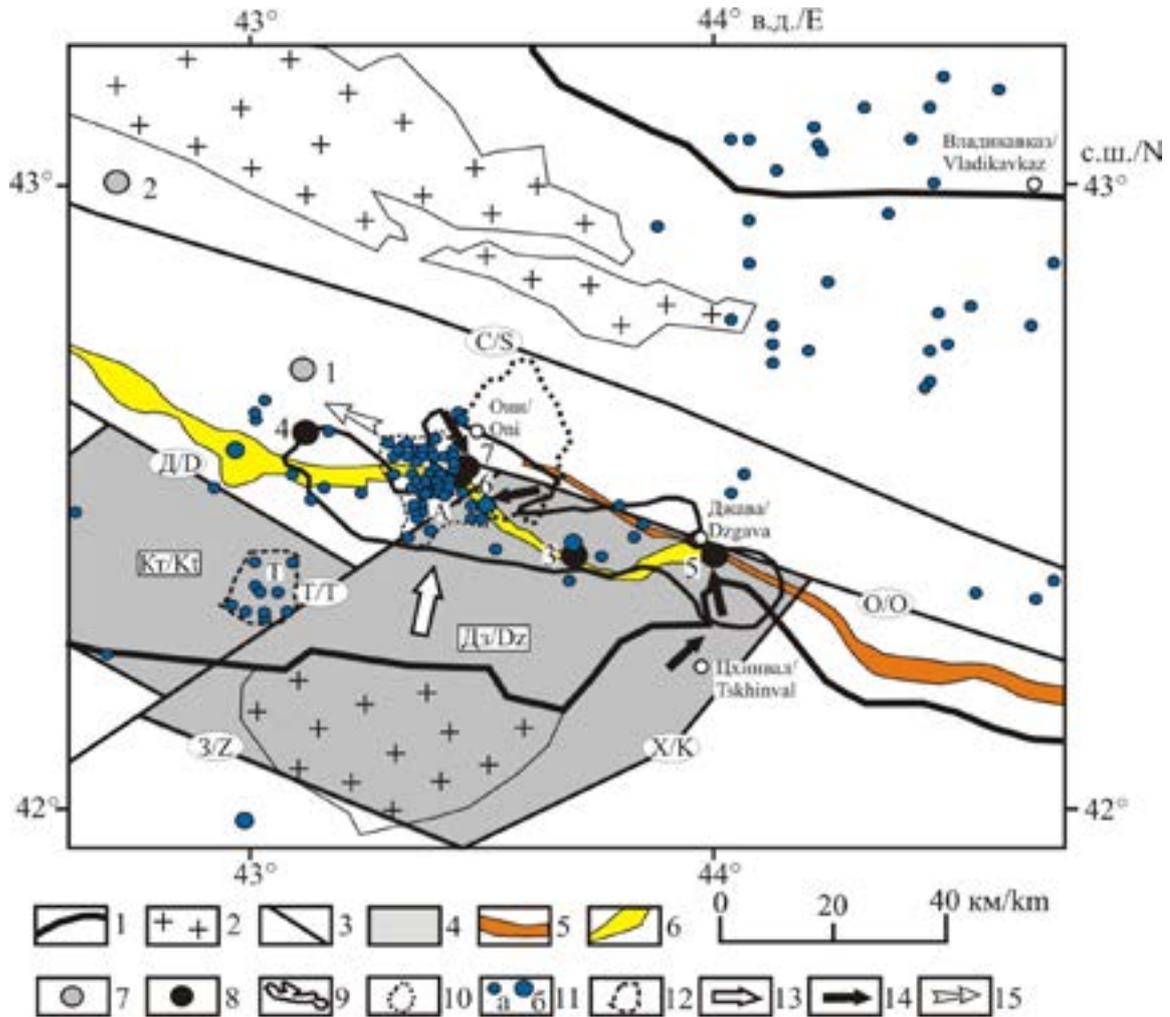


Рис. 5. Сейсмотектоническая модель Рача-Джавской зоны.

1 – границы мегаантиклинория Большого Кавказа по [Геологическая ..., 1978]; 2 – выходы протерозойских метаморфических пород и палеозойских гранитов Центрального сегмента Большого Кавказа и Дзирульского массива Закавказской плиты; 3 – глубинные разломы консолидированной коры по анализу [Гравиметрическая ..., 1990]: С – Сването-Алазанский, З – Зестафонский, О – Онийский, Т – Терзольский, Х – Хашурский; 4 – высокоплотные блоки консолидированной коры: Дз – Дзирульский, Кт – Кутаисский; 5 – Кахетино-Вандамская зона по [Геологическая ..., 1978]; 6 – Рача-Лечхумская грабен-синклиналь по [Геологическая ..., 1978]; 7–8 – сильные землетрясения: 7 – исторические (1 – Лечхуми-Сванетское, 1350 г.; 2 – Лабаскаиди-Церийское, 1750 г.), 8 – инструментальные (3 – Рачинское, 29.04.1991 по каталогу ISC, 4 – афтершок Рачинского землетрясения, 03.05.1991 по данным MOS; 5 – Джавское (Рачинское-II), 15.06.1991; 6 – Онийское-I, 06.02.2006; 7 – Онийское-II, 07.09.2009); 9–10 – эпицентральные области землетрясений: 9 – Рачинского 29.04.1991 г. по [Арефьев и др., 1993], 10 – Онийского-II 07.09.2009 г. по [Габсатарова, 2015]; 11 – эпицентры землетрясений за период 2011–2021 гг.: а – с $2,5 \leq M_S < 4,0$, б – с $M_S \geq 4,0$; 12 – сейсмоактивные узлы (А – Амбролаурский, Т – Ткибульский); 13 – региональный тренд тектонических напряжений; 14 – локальные тектонические напряжения по данным интерпретации GPS; 15 – предполагаемый основной тренд тектонических напряжений Рача-Джавской сейсмической зоны /

Fig. 5. Seismotectonic model of the Racha-Java zone. 1 – boundaries of the megaanticlinorium of the Greater Caucasus according to [Geological ..., 1978]; 2 – outcrops of Proterozoic metamorphic rocks and Paleozoic granites of the Central segment of the Greater Caucasus and the Dzirulsky massif of the Transcaucasian Plate; 3 – deep faults of the consolidated crust according to the analysis [Gravimetric ..., 1990]: S – Svaneto-Alazan, Z – Zestafon, O – Oniyskiy, T – Terzholskiy, X – Khashurskiy; 4 – high-density blocks of the consolidated crust: Dz – Dzirulsky, Kt – Kutaisky; 5 – Kakhertino-Vandamskaya zone after [Geological ..., 1978]; 6 – Racha-Letchumskaya graben-syncline after [Geological ..., 1978]; 7–8 – strong earthquakes: 7 – historical (1 – Letchumi-Svanet, 1350 g.; 2 – Labaskaidi-Tseriyskoe, 1750 g.), 8 – instrumental (3 – Ratchinskoe, 29.04.1991 according to the ISC catalog, 4 – aftershock of the Ratchinskoe earthquake, 03.05.1991 according to the MOS data; 5 – Dzavakha (Ratchinskoe-II), 15.06.1991; 6 – Oniyskoe-I, 06.02.2006; 7 – Oniyskoe-II, 07.09.2009); 9–10 – epicentral areas of earthquakes: 9 – Ratchinskoe 29.04.1991 g. according to [Arefyev et al., 1993], 10 – Oniyskoe-II 07.09.2009 g. according to [Gabsatarova, 2015]; 11 – epicenters of earthquakes for the period 2011–2021 g.: a – with $2,5 \leq M_S < 4,0$, b – with $M_S \geq 4,0$; 12 – seismically active nodes (A – Ambrolaur, T – Tkibulsky); 13 – regional trend of tectonic stresses; 14 – local tectonic stresses according to the interpretation of GPS data; 15 – supposed main trend of tectonic stresses of the Racha-Dzavakha seismic zone /

[Geological ..., 1978]; 6 – Racha-Lechkhumsкая graben-syncline after [Geological ..., 1978]; 7–8 – strong earthquakes: 7 – historical (1 – Lechkhumi-Svanetskoe, 1350; 2 – Labaskaidi-Tseriiskoe, 1750), 8 – instrumental (3 – Racha earthquake, 29.04.1991 according to the ISC catalog, 4 – aftershock of Racha earthquake, 03.05.1991 according to MOS data; 5 – Dzhavskoe (Racha II), 15.06.1991; 6 – Oniy I earthquake, February 6, 2006, 7 – Oniy II earthquake, September 7, 2009); 9–10 – epicentral regions of earthquakes: 9 – Racha earthquake on April 29, 1991 after [Arefiev et al., 1993]; 10 – Oniy II earthquake, September 7, 2009 after [Gabsatarova, 2015]; 11 – earthquake epicenters for the period 2011–2021 years: a – for $2.5 \leq M_S < 4.0$, b – $M_S \geq 4.0$; 12 – seismically active nodes (A – Ambrolaursky, T – Tkibulsky); 13 – regional trend of tectonic stresses; 14 – local tectonic stresses according to GPS interpretation; 15 – the assumed main trend of tectonic stresses in the Racha-Java seismic zone

Эпицентральная область Рачинского землетрясения в плане соответствует северному флангу Дзирульского блока, а вытянутые в северном направлении эпицентральные области Онийских землетрясений в своей южной части – северо-западному углу блока. Гипоцентры сильных землетрясений Рача-Джавской зоны глубиной 10–17 км локализованы в Дзирульском блоке.

В период 2011–2021 гг. активизация сейсмичности отмечается на западном продолжении Онийского разлома (Амбролаурский узел) и северо-западнее Тержольского разлома (Ткибульский узел) в пределах Кутаисского высокоплотного блока.

При сопоставлении полученной по результатам интерпретации геолого-геофизических материалов схемы тектонического строения консолидированной коры Южного склона Большого Кавказа с сейсмичностью показано, что основной сейсмогенерирующей структурой Рача-Джавской зоны является Дзирульский высокоплотный блок Закавказского микроконтинента. Южная часть Дзирульского блока представлена одноименным кристаллическим массивом Закавказского микроконтинента, а сам блок продолжается под мезозойскими отложениями мегаантиклинория Большого Кавказа более чем на 40 км при глубине его подошвы до 20 км. В пределах Северо-Западного сегмента Большого Кавказа к аналогичным локальным сейсмогенерирующими структурами отнесены Анапский и Сочинский блоки кристаллического фундамента, контролируемые одноименные сейсмические районы [Стогний Г., Стогний В., 2019].

Для южной части Центрального сегмента Большого Кавказа при общем региональном северо-северо-восточном тренде тектонических напряжений происходит перераспределение тектонических напряжений на сейсмогенных структурах с формированием локальных систем тектонических напряжений. Локальный уровень определяют блоки первого и более высоких порядков, которые во многом формируют как условия накопления энергии очага землетрясения, так и ее рассеивания.

Рача-Джавская сейсмическая зона приурочена к северному краю Дзирульского высокоплотного блока, ограниченного Онийским глубинным разломом и соответствующего южному борту мезозойского трога (прогиба) мегаантиклинория. Эта тектоническая особенность, по-видимому, являлась определяющей при формировании очага Рачинского землетрясения 29.04.1991 г.

Изменения направлений и величин векторов скорости GPS-пунктов Дзирульского блока имеют сложный характер, в пределах его северной части наблюдается тенденция локальных тектонических напряжений к вращательному движению против часовой стрелки (рис. 5). Такая кинематика тектонических напряжений при основном северо-северо-западном тренде способствовала формированию афтершокового процесса Рача-Джавской зоны, в том числе афтершока 03.05.1991 г. с магнитудой $M_S=5,3$ в западной части зоны.

Землетрясения Онийское-I и Онийское-II имели несколько иную природу, напряжения и их очагах накапливалось достаточно длительный период времени (15–20 лет), а вытянутость их эпицентральных областей в северном направлении обусловлена региональным трендом тектонических напряжений.

Анализ современной сейсмичности изучаемого района за период 2011–2021 гг. позволяет отметить следующее. В пределах северо-западной части района не было землетрясений с $M_s \geq 2,5$, в северо-восточной части сейсмичность носила рассеянный характер. Высокая сейсмическая активность была характерна для его южной части.

Локальной сейсмогенерирующей структурой является, по-видимому, Рача-Лечхумская грабен-синклиналь, в пределах которой за рассматриваемый период наблюдается повышенная концентрация эпицентров, при этом землетрясений с $M_s \geq 4,0$ произошло три из четырех, зарегистрированных на данной площади, четвертое из них произошло к югу от Зестафонского разлома, являющегося юго-западным ограничением Дзирульского блока.

По результатам анализа характера распределения эпицентров землетрясений с $M_s \geq 2,5$ за период 2011–2021 гг. выделено два сейсмоактивных узла: Амбролаурский и Ткибульский. Формирование в течение последнего десятилетия Амбролаурского узла связывается с основным трендом тектонических напряжений Рача-Джавской сейсмической зоны (рис. 5). Учитывая высокую интенсивность проявления сейсмичности в пределах этого узла, можно предположить, что здесь в ближайшие годы может произойти землетрясение с магнитудой, соизмеримой с магнитудой землетрясений Онийское-I и Онийское-II (на уровне 5–6). Ткибульский сейсмоактивный узел расположен в восточной части Кутаисского высокоплотного блока. Кутаисский блок по площади значительно меньше Дзирульского, ожидаемая максимальная магнитуда землетрясения в его пределах не может значительно превышать 5,0.

Выводы

1. Сейсмогенерирующей структурой Рачинского землетрясения 29.04.1991 г. был Дзирульский высокоплотный блок Закавказской плиты размером 40'60 км при глубине его подошвы до 20 км. Южная часть блока представлена выходами протерозойских метаморфических пород и палеозойских гранитов Дзирульского массива, а северная продолжается под мезозойскими отложениями мегаантиклинория Большого Кавказа.

2. Изменения направлений и величин векторов скорости GPS-пунктов Дзирульского блока имеют сложный характер, в пределах его северной части наблюдается тенденция локальных тектонических напряжений к вращательному движению против часовой стрелки. Такая кинематика тектонических напряжений при основном региональном северо-северо-западном тренде способствовала формированию афтершокового процесса Рачинского (29.04.1991) землетрясения.

3. Для землетрясений Онийское-I (06.02.2006) и Онийское-II (07.09.2009) сейсмогенерирующей структурой был Онийский глубинный разлом, ограничивающий Дзирульский высокоплотный блок с севера. Формирование афтершокового процесса данных землетрясений связано с региональным субмеридиональным трендом тектонических напряжений.

4. Основными сейсмогенными структурами южной части Центрального сегмента Большого Кавказа являются Дзирульский и Кутаисский высокоплотные бло-

ки консолидированной земной коры, взаимодействие этих реологических неоднородностей с общим трендом тектонических напряжений северо-северо-восточного направления, обусловленных движением в этом направлении Закавказской плиты, приводит к формированию полей тектонических напряжений локального уровня и очаговых зон землетрясений.

5. Сейсмогенными структурами более высоких порядков являются глубинные разломы, особенно разграничивающие реологически разнородные структуры, в их числе Онийский разлом, являющийся северо-западным ограничением Дзирульского блока, и Рача-Лечхумская грабен-синклиналь, в зоне которой отмечается повышенная сейсмичность.

6. В качестве наиболее сейсмоактивных в последнем десятилетии выделены Амбролаурский и Ткибульский сейсмоактивные узлы, проявляющиеся как участки концентрации эпицентров землетрясений и расположенные соответственно западнее северо-западного угла Дзирульского блока и в восточной части Кутаисского блока. В пределах первого из них в ближайшие годы может произойти сильное землетрясение, по своей магнитуде соизмеримое с магнитудой землетрясений Онийское-I и Онийское-II.

Литература

1. Адамия Ш.А., Габуния Г.Л., Кутелия З.А. Характерные черты тектоники Кавказа. // Геодинамика Кавказа. – М.: Наука, 1989. – С. 3–15.
2. Арефьев С.С., Плетнев К.Г., Татевосян Р.Э. и др. Рачинское землетрясение 1991 г.: результаты полевых сейсмологических наблюдений. // Физика Земли. – 1993. – №3. – С. 12–23.
3. Арефьев С.С., Рогожин Е.А., Быкова В.В., Дорбат К. Глубинная структура очаговой зоны Рачинского землетрясения по сейсмотомографическим данным. // Физика Земли. – 2006. – №1. – С. 30–44.
4. Белоусов Т.П. Рачинское землетрясение 1991 года и его проявление в рельефе Большого Кавказа. – М.: Светоч Плюс, 2009. – 208 с.
5. Габсатарова И.П. Онийское-II землетрясение 7 сентября 2009 г. с $K_p=14,2$, $M_S=5,8$ (Грузия). // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 325–333.
6. Габсатарова И.П., Головкова Л.В., Селиванова Е.А. Онийское землетрясение 6 февраля 2006 г. с $M_S=5,0$, $I_{0p}=6$ (Грузия). // Землетрясения Северной Евразии, 2006 год. Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 308–313.
7. Гамкрелидзе П.Д., Гамкрелидзе И.П. Тектонические покровы южного склона Большого Кавказа. – Тбилиси: Мецниереба, 1977. – 82 с.
8. Геологическая карта России и сопредельных государств (в границах бывшего СССР). М-б 1:5 000 000. Под ред. Р.И. Соколова – СПб: ВСЕГЕИ, 1992. – 2 листа.
9. Геологическая карта Кавказа. Масштаб 1:500 000 / Гл. редактор Д.В. Наливкин. – М.: НПО «Аэрогеология», 1978.
10. Гиоргобиани Т.В. Пододвигается ли Черноморско-Закавказский микроконтинент под Большой Кавказ? // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. – М.: ГЕОС, 2008. – С. 188–194.
11. Горбатиков А.В., Рогожин Е.А., Степанова М.Ю., Харазова Ю.В., Андреева Н.В., Передерин Ф.В., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Дзеранов Б.В., Дзедобоев Б.А., Габараев А.Ф. Особенности глубинного строения и современной тектоники Большого Кавказа в Осетинском секторе по комплексу геофизических данных // Физика Земли. – 2015. – №1. – С. 28–39.

12. Гравиметрическая карта СССР. Масштаб 1 : 2 500 000 / Гл. редакторы: П.П. Степанов, М.А. Якушевич. – М.: ВНИИ «Геофизика». – 1990.
13. Заалишвили В.Б., Бондырев И.В. Геоморфология и палеогеография Рачи. // Опасные природные и техногенные процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа. – Владикавказ: ЦГИ ВНИЦ РАН, 2010. – С. 105–138.
14. Лукк А.А., Шевченко В.И. Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа. // Физика Земли. – 2019. – №4. – С. 99–123.
15. Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Ларьков А.С., Новиков С.С. Позднечетвертичные дислокации и сеймотектоника очага Рачинского землетрясения (Большой Кавказ). // Геотектоника. – 2014. – №6. – С. 55–76.
16. Павленкова Г.А. Строение земной коры Кавказа по профилям ГСЗ Степное-Бакуриани и Волгоград-Нахичевань (результаты переинтерпретации первичных данных). // Физика Земли. – 2012. – №5. – С. 16–23.
17. Папалашвили В.Б., Варазанашвили О.Ш., Гогмачадзе С.А., Заалишвили В.Б., Кипиани Д.Г., Махатадзе Л.Н., Мушадзе Т.Г., Чачава Т.Н., Аивазишвили И.В. Рача-Джавское землетрясение 29 апреля 1991 г. // Землетрясения в СССР в 1991 году. Сборник научных трудов. – М.: ОИФЗ РАН, 1997. – С. 18–25.
18. Рогожин Е.А. Тектоническая позиция, сейсмологические и геологические проявления очага Онийского-II землетрясения 7 сентября 2009 г. на южном склоне Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – №4. – С. 109–115. DOI: 10.23671/VNC.2017.4.9530.
19. Рогожин Е.А., Борисов Б.А., Богачкин Б.М. Рачинское землетрясение (Грузия, 29 апреля 1991г.): материалы геологического обследования. // Докл. АН СССР. – 1991. – Т. 321. №2. – С. 352–358.
20. Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Овсяченко А.Н., Андреева Н.В., Харазова Ю.В. Структура и современная геодинамика мегаантиклинория Большого Кавказа в свете новых данных о глубинном строении. // Геотектоника. – 2015. – №2. – С. 36–49.
21. Стогний В.В., Заалишвили В.Б., Пономарева Н.Л. Современная геодинамика и сейсмичность Северного Кавказа: проблемы мониторинга. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. Т. 12. №2. – С. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003
22. Стогний В.В., Стогний Г.А. Локальные сейсмогенерирующие структуры южного склона западного Кавказа. // Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. / Под ред. В.Б. Заалишвили. – Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН, 2022. – С. 110–113. DOI: 10.33580/7985904868277_110
23. 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.
24. Стогний Г.А., Стогний В.В. Сеймотектоническая модель Северо-Западного Кавказа: геолого-геофизический аспект. // Физика Земли. – 2019. – №4. – С. 124–132. DOI: /10.31857/S0002-333720194124-132
25. Тектоника южного обрамления Восточно-Европейской платформы (Объяснительная записка к тектонической карте Черноморско-Каспийского региона. Масштаб 1 : 2 500 000). / Под ред. В.Е. Хаина, В.И. Попкова. – Краснодар: Кубан. гос. ун-т, 2009. – 213 с.
26. Шевченко В.И., Гусева Т.В., Лукк А.А., Мишин А.В., Прилепин М.Т., Рейлинджер Р.Э., Хамбургер М.У., Шемпелев А.Г., Юнга С.Л. Современная геодинамика Кавказа (по результатам GPS измерений и сейсмическим данным). // Физика Земли. – 1999. – №9. – С. 3–18.
27. Шевченко В.И., Гусева Т.В., Лукк А.А., Прилепин М.Т., Стеблов Г.М., Милуков В.К., Миронов А.П., Кусраев А.Г., Дробышев В.Н., Хубаев Х.М. Неплейттекtonическая GPS-геодинамика Большого Кавказа. // Тектоника, геодинамика и рудогенез складчатых поясов и платформ. Материалы XLVIII Тектонического совещания. Т.2. – М.: ГЕОС. – 2016. – С. 295–299.

28. Шевченко В.И., Лукк А.А., Гусева Т.В. Автономная и плейттектоническая геодинамика некоторых подвижных поясов и сооружений. – М.: ГЕОС. – 2017. – 612 с.
29. Fuenzalida H., Rivera L., Haessler H., Legrand D., Philip H., Dorbath, L., McCormack D., Arefiev S., Langer C., Cisternas A. Seismic source study of the Racha-Dzhava (Georgia) earthquake from aftershocks and broad-band teleseismic body-wave records: an example of active nappe tectonics. // *Geophys. J. Int.* – 1997. – Vol. 130(1). – pp. 29–46.
30. Gamkrelidze I., Giorgobiani T., Kuloshvili S., Lobjanidze G., Shengelaia G. Active deep faults map and the catalogue for the territory of Georgia. // *Bull. Georgian Acad. Sci.* – 1998. – Vol. 157(1). – pp. 80–85.
31. Reilinger R., McClusky S., Vernant P. 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. Is. B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051
32. Srijayanthi G., Kumar M.R., 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
33. 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. // *J. of Asian Earth Sciences.* – 2020. – Vol. 188. – pp. 1–18.
34. Triep E.G., Abers G.A., Lerner-Lam A.L., Mishatkin V., Zakharchenko N., Starovoit O. Active thrust front of the Greater Caucasus: the April 29, 1991, Racha earthquake sequence and its tectonic implications. // *J. Geophys. Res.* – 1995. – Vol. 100(B3). – pp. 4011–4033.
35. Tseng T.-L., Hsu H.-C., Jian P.-R., Huang B.-S., Hu J.-C., Chung S.-L. Focal mechanisms and stress variations in the Caucasus and Northeast Turkey from constraints of regional waveforms. // *Tectonophysics.* – 2016. – Vol. 691. – pp. 362–374.
36. Varazanashvili O., Tsereteli N., Tsereteli E. Historical earthquakes in Georgia (up to 1900): source analysis and catalogue compilation. Monograph. – Tbilisi: Pub. House MVP. – 2011. – 81 p.
37. Yadav R.K., Roy P.N.S., Gupta S.K., Khan P.K. et al. Rupture model of Mw 7.8 2015 Gorkha, Nepal earthquake: Constraints from GPS measurements of coseismic offsets. // *Journal of Asian Earth Sciences.* – 2017. – Vol. 133. – pp. 56–61. DOI: 10.1016/j.jseae.2016.04.015.
38. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Mel'kov D.A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of northern Caucasus. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* – 2014. – Vol. 50(2). – pp. 263–272.
39. Zare M., Amini H., Yazdi P., Seseian K., Demircioglu M.B., Kalafat D., Erdik M., Giardini D., Khan M.A., Tsereteli N. Recent developments of the Middle East catalog. // *J. Seismolog.* – 2014. – Vol. 18(4). – pp. 749–772.

References

1. Adamia Sh.A., Gabunia G.L., Kutelia Z.A. Characteristic features of the tectonics of the Caucasus. *Geodynamics of the Caucasus.* Moscow, Nauka. 1989. pp. 3–15. (In Russ.)
2. Arefiev S.S., Pletnev K.G., Tatevosyan R.E. et al. Racha earthquake of 1991: results of field seismological observations. *Physics of the Solid Earth.* 1993. No. 3. pp. 12–23. (In Russ.)
3. Arefiev S.S., Rogozhin E.A., Bykova V.V., Dorbath C. Deep structure of the Racha earthquake source zone from seismic tomography data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* 2006. T. 42. № 1. C. 27–40.
4. Belousov T.P. Racha earthquake of 1991 and its manifestation in the relief of the Greater Caucasus. Moscow, Svetoch Plus, 2009. 208 p. (In Russ.)
5. Gabsatarova I.P. Oni II earthquake on September 7, 2009 with $K_p=14.2$, $MS=5.8$ (Georgia). *Earthquakes of Northern Eurasia, 2009.* Obninsk, GS RAS. 2015. pp. 325–333. (In Russ.)
6. Gabsatarova I.P., Golovkova L.V., Selivanova E.A. Oni earthquake on February 6, 2006 with $MS=5.0$, I_{op} (Georgia). *Earthquakes of Northern Eurasia, 2006.* Obninsk, GS RAS. 2012. pp. 308–313. (In Russ.)

7. Gamkrelidze P.D., Gamkrelidze I.P. Tectonic covers of the southern slope of the Greater Caucasus. Tbilisi, Metsniereba. 1977. 82 p. (In Russ.)
8. Geological map of Russia and neighboring states (within the borders of the former USSR). Scale 1:5 000 000. Ed. R.I. Sokolova. Saint Petersburg, VSEGEI, 1992. 2 sheets.(In Russ.)
9. Geological map of the Caucasus. Scale 1:500,000. Ch. editor D.V. Nalivkin. Moscow,NPO “Aerogeology”. 1978.(In Russ.)
10. Giorgobiani T.V. Is the Black Sea–Transcaucasian microcontinent moving under the Greater Caucasus? General and regional problems of tectonics and geodynamics. Moscow, GEOS. 2008. pp. 188–194.(In Russ.)
11. Gorbatikov A.V., Rogozhin E.A., Stepanova M.Y., Kharazova Y.V., Andreeva N.V., Perederin F.V., Dzeboev B.A., Zaalishvili V.B., Mel’kov D.A., Dzeranov B.V., Gabaraev A.F. The pattern of deep structure and recent tectonics of the Greater Caucasus in the Ossetian sector from the complex geophysical data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2015. Vol. 51. No. 1. pp. 26–37. DOI: 10.1134/S1069351315010073
12. Gravimetric map of the USSR. Scale 1:2,500,000. Ch. editors: P.P. Stepanov, M.A. Yakushevich. Moscow, Geophysics. 1990. (In Russ.)
13. Zaalishvili V.B., Bondyrev I.V. Geomorphology and paleogeography of Racha. In: Proc. Dang. Nat. and techn. Proc. in the mount. and foothill areas of the North Caucasus. Vladikavkaz, 2010. pp. 105–138. (In Russ.)
14. Lukk A.A., Shevchenko V.I. Seismicity, tectonics, and GPS geodynamics of the Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2019. Vol. 55. № 4. pp. 626–648. DOI: 10.1134/S1069351319040062.
15. Ovsyuchenko A.N., Marakhanov A.V., Lar’kov A.S., Novikov S.S. Late quaternary dislocations and seismotectonics of the Racha earthquake source, the Greater Caucasus. *Geotectonics*. 2014. Vol. 48. No. 6. pp. 440–458. DOI: 10.1134/S0016852114050057
16. Pavlenkova G.A. Crustal structure of the Caucasus from the Stepnoe-Bakuriani and Volgograd-Nakhichevan DSS profiles (reinterpretation of the primary data). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2012. T. 48. № 5. C. 375–384. DOI: 10.1134/S1069351312040040
17. Papalashvili V.B., Varazanashvili O.Sh., Gogmachadze S.A., Zaalishvili V.B., Kipiani D.G., Mahatadze L.N., Mushadze T.G., Chachava T.N., Aivazishvili I.V. Racha-Java earthquake April 29, 1991. Earthquakes in the USSR in 1991. Proceedings of scientific papers. Moscow: UIPE RAS, 1997. pp. 18–25. (In Russ.)
18. Rogozhin E.A. Tectonic position, seismological and geological manifestations of the focus of the September 7, 2009 Oni II earthquake on the southern slope of the Greater Caucasus: *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2017. No. 4. P. 109–115.
19. Rogozhin E.A., Borisov B.A., Bogachkin B.M. Racha earthquake (Georgia, April 29, 1991): materials of geological survey. *Doklady. Academy of Sciences of the USSR*. 1991. Vol. 321. No. 2. pp. 352–358. (In Russ.)
20. Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Y., Ovsyuchenko A.N., Andreeva N.V., Kharazova Y.V. The structural framework and recent geodynamics of the greater Caucasus meganticlinorium in the light of new data on its deep structure. *Geotectonics*. 2015. Vol. 49. No. 2. pp. 123–134. DOI: 10.1134/S0016852115020053.
21. Stogny V.V., Zaalishvili V.B., Ponomareva N.L. Modern geodynamics and seismicity of the North Caucasus: problems of monitoring. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2022. V.12(2). pp. 34–52.
22. Stogny V.V., Stogny G.A. Local seismogenic structures of the southern slope of the Western Caucasus. In: Proc. Dang. Nat. and techn. Proc. in the mount. regions: models, systems, technologies. Vladikavkaz, 2022. pp. 110–113. (In Russ.)
23. Stogny G.A., Stogny 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.)
24. Stogny G.A., Stogny V.V. Seismotectonic model of the Northwest Caucasus: geological-

geophysical aspect. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2019. Vol. 55. No. 4. pp. 649–656. DOI: 10.1134/S1069351319040116. DOI: 10.1134/S1069351319040116.

25. Tectonics of the southern framing of the East European Platform (Explanatory note to the tectonic map of the Black Sea-Caspian region. Scale 1:2,500,000). Ed.: V.E. Khaina, V.I. Popkov. Krasnodar, KSU, 2009. 213 p. (In Russ.)

26. Shevchenko V.I., Guseva T.V., Lukk A.A., Mishin A.V., Prilepin M.T., Reilinger R.E., Hamburger M.U., Shempelev A.G., Yunga S.L. Modern geodynamics of the Caucasus (according to the results of GPS measurements and seismic data). *Physics of the Solid Earth*. 1999. No. 9. pp. 3–18. (In Russ.)

27. Shevchenko V.I., Guseva T.V., Lukk A.A., Prilepin M.T., Steblou G.M., Milyukov V.K., Mironov A.P., Kusraev A.G., Drobyshev V.N., Khubaev Kh.M. Non-platetectonic GPS geodynamics of the Greater Caucasus. In: Proc. of XLVIII of the Tectonic Conference Tectonics, geodynamics and ore genesis of folded belts and platforms. Vol.2. Moscow, GEOS. 2016. pp. 295–299. (In Russ.)

28. Shevchenko V.I., Lukk A.A., Guseva T.V. Autonomous and platetectonic geodynamics of some mobile belts and structures. Moscow. GEOS. 2017. 612 p. (In Russ.)

29. Fuenzalida H., Rivera L., Haessler H., Legrand D., Philip H., Dorbath, L., McCormack D., Arefiev S., Langer C., Cisternas A. Seismic source study of the Racha-Dzhava (Georgia) earthquake from aftershocks and broad-band teleseismic body-wave records: an example of active nappe tectonics. *Geophys. J. Int.* 1997. Vol. 130. Issue 1. pp. 29–46.

30. Gamkrelidze I., Giorgobiani T., Kuloshvili S., Lobjanidze G., Shengelaia G. Active deep faults map and the catalogue for the territory of Georgia. *Bull. Georgian Acad. Sci.* 1998. Vol. 157. Issue 1. pp. 80–85.

31. Reilinger R., McClusky S., Vernant P. 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.

32. Srijayanthi G., Kumar M.R., 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.

33. 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. *J. of Asian Earth Sciences*. 2020. Vol. 188. pp. 1–18.

34. Triep E.G., Abers G.A., Lerner-Lam A.L., Mishatkin V., Zakharchenko N., Starovoit O. Active thrust front of the Greater Caucasus: the April 29, 1991, Racha earthquake sequence and its tectonic implications. *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100 (B3). pp. 4011–4033.

35. Tseng T.-L., Hsu H.-C., Jian P.-R., Huang B.-S., Hu J.-C., Chung S.-L. Focal mechanisms and stress variations in the Caucasus and Northeast Turkey from constraints of regional waveforms. *Tectonophysics*. 2016. Vol. 691. pp. 362–374.

36. Varazanashvili O., Tsereteli N., Tsereteli E. Historical earthquakes in Georgia (up to 1900): source analysis and catalogue compilation. Monograph. Tbilisi, Pub. House MVP. 2011. 81 p.

37. Yadav R.K., Roy P.N.S., Gupta S.K., Khan P.K. et al. Rupture model of Mw 7.8 2015 Gorkha, Nepal earthquake: Constraints from GPS measurements of coseismic offsets. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2017. Vol. 133. pp. 56–61. DOI: 10.1016/j.jseaes.2016.04.015.

38. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Mel'kov D.A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of northern Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014. Vol. 50(2). pp. 263–272.

39. Zare M., Amini H., Yazdi P., Sestetian K., Demircioglu M.B., Kalafat D., Erdik M., Giardini D., Khan M.A., Tsereteli N. Recent developments of the Middle East catalog. *J. Seismolog.* 2014. Vol. 18 (4). pp. 749–772.

УДК 552.323.5

DOI: [10.46698/VNC.2023.80.89.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.80.89.007)

Оригинальная статья

Высоко-фракционированные гранитоиды Пшишского редкометалльного рудного поля Северного Кавказа

А.И. Гусев 

Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина, Россия, 659333, г. Бийск, ул. Короленко, 53, e-mail: anzerg@mail.ru

Статья поступила: 26.01.2023, доработана: 27.02.2023, одобрена в печать: 03.03.2023

Резюме: Актуальность работы. На Северном Кавказе описаны различные типы гранитоидов разного возраста и состава. Позднепалеозойский этап формирования Центрального мегаблока Большого Кавказа имеет важнейшее значение в формировании гранитоидного магматизма и его металлогении. Интрузивный магматизм Пшишского рудного поля не получил освещения в литературе, однако с ним тесно связано оруденение стратегических металлов: бериллия, тантала, ниобия, вольфрама, лития. **Целью исследования** является получение комплексной петрологической и геохимической характеристики рудогенерирующих ультракислых гранитоидов и их типизация на современном уровне. Объектом для исследований были выбраны малые интрузии и сопровождающие их дайковые и жильные образования Пшишского участка, выделенного в качестве потенциального редкометалльного рудного поля. Материалы исследования. Материалы, используемые в статье, получены автором в процессе проведения специализированных металлогенических исследований, проводимых с 1967 года на Большом Кавказе. **Методы исследования.** Методы изучения, кроме геологического и петрографического описания пород и метасоматитов, включали получение количественных характеристик состава пород. Силикатный анализ пород на главные компоненты проведен рентгено-спектральным флуоресцентным методом, Co, Ni, Zn, Pb, Li, Sc, Cu – ISP-AES, остальных элементов, в том числе РЗЭ (редкоземельных элементов) – методом ISP-MS. Анализ пород проводился в лаборатории Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (г. Москва). **Результаты работы.** В результате комплексных исследований получены новые данные по петрогеохимии кремнекислого магматизма Пшишского участка с выделением двух фаз внедрения: двуслюдяных лейкогранитов и лейкогранитов. Рассмотрены также дайки грейзенизированных лейкогранитов и онгонитов. Все интрузивные дериваты генерированы путём плавления фельзических пелитов нижней коры и отнесены к высоко-фракционированным разностям, при формировании которых происходило кристалл-фракционирование полевых шпатов, роговой обманки, а также акцессориев – апатита, аллана, монацита. В породах проявлены 2 типа тетрадного эффекта фракционирования редкоземельных элементов M- и W-типов. Менявшиеся физико-химические условия магматогенных флюидов приводили к предпочтительному обогащению последних рудными компонентами в условиях повышения щёлочности среды.

Ключевые слова: ультракислые гранитоиды, двуслюдяные лейкограниты, лейкограниты, грейзенизированные граниты, онгониты, тетрадный эффект фракционирования РЗЭ, кислотность-щёлочность среды.

Для цитирования: Гусев А.И. Высоко-фракционированные гранитоиды Пшишского редкометалльного рудного поля Северного Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(1): 97-111. DOI: 10.46698/VNC.2023.80.89.007.

DOI: [10.46698/VNC.2023.80.89.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.80.89.007)

Original paper

High-fractionation granitoids of Pschish rare metal of district the Northern Caucasus

A.I. Gusev 

Shukshin Altai State University for Humanities and Pedagogy, 53 Korolenko str., Biisk 659333,
Russian Federation, e- mail: anzerg@mail.ru

Received: 26.01.2023, revised: 27.02.2023, accepted: 03.03.2023

Abstract: Relevance. The different type of granitoids various ages and composition described on the Northern Caucasus. The Late Paleozoic stage of forming Central megablock Greater Caucasus has significant meaning in forming granitoids magmatism and it metallogeny. The igneous magmatism of Pschish ore district did not receive illuminating in geological literature but ore mineralization of strategic metals of beryllium, tantalium, niobium, tungsten, lithium with it related. **The aim of the study** is to receive complex petrological and geochemical characteristics of ore generating of ultra acidic granitoids and its typization on the modern level. Objects of researching werechoose an epithermal deposits and manifestations gold-silver types in all tectonic zones of region. Materials of researching. Materials, using in paper, received by of author in process carrying out of prospecting, prospecting-estimation, geology-survey (1:50000) and special metallogenic researching that it conducted from 1967 year on the Greater Caucasus. **Methods.** Methods of study except of geological and petrographic of description of felsic granitoidsand include receiving quantitative characteristic of composition rocks. The silicate analysis of rocks on the basic components determined by roentgen spectral fluorescent method, Co, Ni, Zn, Pb, Li, Sc, Cu – by ISP-AES, the other elements and REE – by method ISP-MSin Laboratory of Institute of Mineralogy, Geochemistry and crystal chemistry of rare elements (с. Moscow). **Results.** New data received on typezation of petro-geochemical silica-acid magmatism of Pschish areal with detach of two phase intrusion: two-mica leucogranites and leucotranites. Dikes of greisenization leucogranites and ongonitesdiscernedso. All intrusive derivates of Pschish areal generated by melting of felsic pellites lower crust and carry to high fractionation differences forming of its took place crystal-fractionation of feldspars, hornblende, and so accessory minerals – apatite, allanite, monazite. Two types tetradiceffectfractionationofrareearth elements M – and W- types display in rocks. The physic-chemistry conditions change and it lead to preferable of enriching fluids of ore components in conditions rise of alkali environment.

Keywords: ultraacidic granitoids, two mica leucogranites, leucogranites, greisenizationleucogranites, ongonites, tetradic effect fractionation of REE, acidic-alkaly environment.

For citation: Gusev A.I. Early High-fractionation granitoids of Pschish rare metal of district the Northern Caucasus. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(1): 97-111. DOI: 10.46698/VNC.2023.80.89.007.

Введение

На Большом Кавказе развиты разнообразные типы гранитоидов, среди которых преобладают средне- и позднепалеозойские, слагающие ядерную часть Центрального Кавказа [Gurbanov et al., 1992; Гамкрелидзе, Шенгелия, 2005]. К позднепалеозойскому этапу гранитоидного магматизма относятся и необычные для Кавказского региона ультракислые лейкограниты Пшишского и Вазахохского участков, относи-

мых к Пшиш-Вазахохскому интрузивному комплексу. Они отличаются необычными формами интрузий, составом, сопровождающими жильными и дайковыми образованиями, а также пространственно и парагенетически связанным с ними редкометалльным оруденением. На Пшишском участке присутствует оруденение металлов Ве, Та, Nb и Li, относящихся к стратегическим материалам. Минерально-сырьевая база России испытывает дефицит в указанных металлах.

Известно, что корово-производные лейкограниты, характеризующиеся высокими содержаниями кремния и алюминия, обязаны присутствию в их составе пералюминиевых минералов, таких как гранат, мусковит, турмалин и кордиерит [Hu et al., 2018]. Так как лейкограниты образуются в результате частичного плавления корового материала или в результате корового анатексиса, то вещественный состав этих пород в пределах орогенных поясов сохраняет в себе геохимические и изотопные признаки их источника плавления и может обеспечивать признаки геодинамической и термальной эволюции тектонически утолщённой земной коры [Zhang et al., 2019; Парада, 2021; Газеев и др., 2022]. Однако природа и ассоциированные источники плавления пород дебатированы в литературе. Существуют 3 главных типа моделей по петрогенезису лейкогранитов: 1 – частичное плавление метаосадков в нижней-средней земной коре в согласии с петрологическими экспериментальными данными и геохимическими особенностями [Ma et al., 2017]; 2 – высоко-фракционированные магмы, производные из материнских расплавов при высоких температурах, делающие их источник характеристик трудно определяемым [Wu et al., 2017]; и 3 – высоко Sr/Y-лейкограниты в пределах Гималаев, подразумевающие происхождение в результате частичного плавления амфиболитов в условиях утолщённой земной коры [Hu et al., 2018]. Все перечисленные факты не вызывают сомнений в актуальности изучения лейкогранитов Пшишского участка.

Методы исследований

Аналитические исследования состава пород выполнены стандартными методами в сертифицированной Лаборатории Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (г. Москва). Проведен комплексный анализ состава пород с привлечением данных экспериментальных исследований по плавлению различных пород и современных диаграмм для типизации пород Пшишского участка и установления их генезиса. Построена авторская диаграмма Nb–TE_{1,3}, устанавливающая зависимость концентраций ниобия и тетрадного эффекта фракционирования редкоземельных элементов для пород участка. Авторская диаграмма Eu/Eu*–TE_{1,3} для породных типов Пшишского ареала позволяет выявлять кислотно-щелочные условия среды, что очень важно для понимания связи флюидного режима и тантал-ниобиевого оруденения.

Геологическое строение Пшишского участка

Пшишское редкометалльное рудное поле располагается в верховьях одноименной реки (правый приток реки Архыз) и её правого притока – реки Белой (рис. 1).



Рис. 1. Расположение участка Пшиш /
Fig. 1. Position of tract Pshish

В Пшишском Ве-Ta-Nb-рудном поле развиты малые интрузии неправильной и амёбовидной форм размерами от 0,1 до 2 км², интрузирующих раннепалеозойские гнейсы. Сложены они двуслюдяными лейкогранитами ранней (главной) фазы и лейкократовыми гранитами 2 фазы внедрения. В местах проявления поздней фазы лейкогранитов отмечены дайки грейзенизированных и альбитизированных гранитов, аплитов, онгонитов, а также жилы пегматитов (рис. 2).

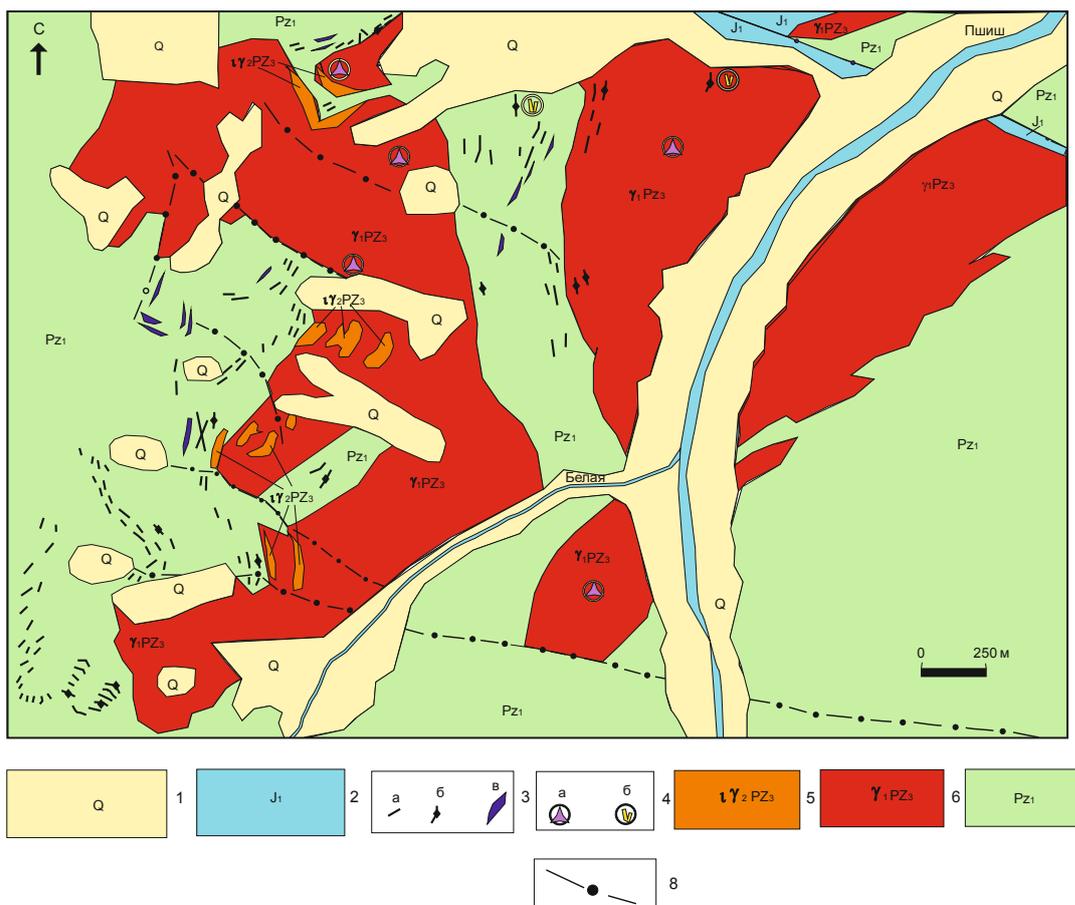


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Пшишского участка (составлена автором с учётом данных Кузнецова К.М., Усика В.И.):
1) нерасчленённые аллювиальные, делювиальные моренные образования квартера; 2) глинистые сланцы, алевролиты и песчаники ранней юры; 3) дайки и жилы: а – грейзенизированных и

альбитизированных гранит-порфиров, онгонитов и аплитов, б – пегматитов, в – кварцевых жил; 4) вкрапленность: а – танталита, б – берилла; 5) мелко-кристаллические лейкограниты второй фазы внедрения позднепалеозойского комплекса; 6) средне-кристаллические двуслюдяные лейкограниты первой (главной) фазы внедрения позднепалеозойского комплекса; 7) лейкократовые и меланократовые гнейсы раннего палеозоя; 8) разломы /

Fig. 2. Schematic geological map of Pshish tract (composed by author with discount data of Kuznetsov K.M., Usik V.I.):

1) non dissected alluvial, talus, tillstone deposits of quartz; 2) shales, aleurolites and sandstones of Early Jurassic; 3) dikes and veins: a – greisenization and albitization of granite porphyres, ongonites and aplites, b – pegmatites, c – quartz veins; 4) disseminate; a – tantalite, b – beryl; 5) fine crystalline leucogranites of second phase intrusion of Late Paleozoic complex; 6) middle crystalline two mica leucogranite of first (basic) phase intrusion of Late Paleozoic complex; 7) leucocratic and melanocratic gneiss of Early Paleozoic; 8) faults

Краткая петрографическая характеристика пород

Двуслюдяные лейкограниты главной фазы внедрения слагают центральные части интрузий и представляют собой среднезернистые массивные породы серой и светло-серой окраски. Их состав (%): плагиоклаз (32–47), микроклин (5–25), кварц (30–60), биотит (1–6), мусковит (2–4), протолитионит (1–2). Структура гипидиоморфно-зернистая. Акцессорные минералы: апатит, монацит, ксенотим, ильменит, циркон, анатаз, реже – рутил, гранат, пирит, циртолит. Плагиоклаз (альбит-олигоклаз №№9–28) идиоморфный, образует короткопризматические выделения размерами 0,5–3,3 мм. Микроклин решётчатого строения, ксеноморфен часто содержит резорбированные фрагменты кварца и плагиоклаза. Он местами слабо пелитизирован. Кварц ксеноморфен, образует округлые зёрна с облачным погасанием. Чешуйки биотита часто хлоритизированы и содержат скопления лейкоксена с реликтами рутила. Изредка в биотите наблюдаются включения циркона и апатита. Мусковит наблюдается в виде мелкочешуйчатых скоплений вблизи биотита. Протолитионит изредка присутствует в тесном парагенезисе с мусковитом.

Лейкократовые граниты второй фазы пользуются нешироким распространением в приконтактных частях интрузивов в виде зон и жил мощностью от 2 до 50 м и протяжённостью от 150 до 500 м. Такое положение лейкогранитов второй фазы в приконтактной части интрузивов указывает на проявление обратной зональности некоторых массивов. Она проявляется тогда, когда более эволюционированные порции магмы локализуются на периферии; контакты между фазами и фациями контрастные с дискордантными текстурами [Vignerresse, 2007]. Характер зональности интрузивов интерпретируется как результат химической дифференциации и скорости поступления последовательных фаз из глубинного очага. В случае быстрого поступления фаз и отдельных пульсаций предыдущие поступления не успевают закристаллизоваться и более поздние дериваты их легко прорывают и располагаются в центре интрузивов с формированием нормальной зональности. Наоборот, когда скорость становления массивов малая предыдущие фазы внедрения успевают закристаллизоваться и тогда более поздние фазы внедряются на периферию магматических тел с образованием обратной зональности. Внешне лейкократовые граниты второй фазы средне-крупнозернистые, иногда пегматоидного облика. Структуры гипидиоморфно-зернистая и аллотриоморфно-зернистая. Их состав такой же, как и двуслюдяных лейкогранитов. Плагиоклаз по составу отвечает альбит-олигоклазу с №№8–24 и представлен таблитчатыми кристаллами, полисинтетически сдвоенными размерами 0,5–2 мм. Микроклин резко ксеноморфен и имеет часто

распльвчатую решётчатую микроструктуру. Аксессуары в лейкогранитах – апатит, монацит, ильменит, циркон, рутил, анатаз. А в связи с процессами альбитизации и грейзенизации появляются гранат, циртолит, турмалин, топаз, вольфрамит, молибденит.

Грейзенизированные граниты наибольшее распространение получили вблизи контактов интрузивов и тесно ассоциируют с лейкократовыми гранитами. Их состав характеризуется преобладанием кварца (40–60%), существенной ролью плагиоклаза (20–30%) и мусковита (10–12%). Микроклин (5–12%) присутствует не повсеместно и часто замещается кварцем. Ксеноморфные зёрна первично магматического кварца в грейзенизированных гранитах испытывают перекристаллизацию и в связи с привнесением кремнезёма формируют мелкие зёрна с идиоморфными очертаниями. Плагиоклаз в грейзенизированных гранитах замещается мусковитом и в меньшей степени кварцем. Помимо, альбит-олигоклаза при грейзенизации появляются идиоморфные кристаллики альбита №3–6 свежего облика. Микроклин при грейзенизации активно замещается кварцем, не подвергаясь мусковитизации. Типоморфными аксессуарами грейзенового процесса являются гранат, турмалин, топаз, вольфрамит, молибденит. Пентагон-додекаэдрические и тетрагон-триоктаэдрические кристаллики граната размерами от 0,03×0,03 до 0,4×0,4 мм имеют розовый цвет и относятся к алмандину. На некоторых кристаллах наблюдаются скульптурные линии типа ступенчатого излома. Турмалин призматического габитуса со сглаженными рёбрами и гранями имеет размеры от 0,03×0,1 до 0,3×1,2 мм.

Дайковые онгониты приурочены в основном к толще метаморфических пород нижнего палеозоя (сланцы, гнейсы, амфиболиты) и тесно ассоциируют с грейзенизированными и альбитизированными гранитами и аплитами. Отдельные дайки онгонитов встречаются в эндоконтактной зоне лейкократовых гранитов и альбитизированных и грейзенизированных гранитов. Структура онгонитов порфировая, а основной ткани – аллотриоморфно-зернистая. Вкрапленники представлены кали-натриевым полевым шпатом, альбитом, кварцем, более редкими кристаллами литиевого фенгита, а также протолитионита. Количество порфировых выделений варьирует от 15 до 23%. Вкрапленники кварца часто дают дипирамидальные формы выделений. Среди второстепенных и аксессуарных минералов в онгонитах встречаются топаз, циркон, монацит, ильменит, ксенотим, криолит, танталит-колумбит, касситерит, турмалин, флюорит, шеелит и апатит.

Петро-геохимический очерк пород

Состав пород Пшишского участка отражён в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Химический состав гранитоидов Пшишского участка (оксиды в %, элементы – в г/т). / Chemical composition of granitoids Pshish tract (oxides in %, elements – in ppm)

Компоненты / Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	74,37	74,4	74,6	75,46	75,1	75,4	77,6	77,7	75,5
TiO ₂	0,10	0,12	0,11	0,18	0,16	0,15	0,01	0,01	0,03
Al ₂ O ₃	15,01	14,98	15,02	14,63	14,9	14,77	13,86	13,85	15,1
Fe ₂ O ₃	0,11	0,12	0,11	0,03	0,04	0,03	0,31	0,25	0,05
FeO	1,06	0,99	0,98	0,97	0,92	0,89	0,6	0,56	0,7

Компоненты / Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9
MnO	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,11
MgO	0,12	0,11	0,11	0,25	0,16	0,15	0,3	0,26	0,14
CaO	0,94	0,91	0,89	0,82	0,81	0,83	0,7	0,49	0,36
Na ₂ O	3,28	3,3	3,36	3,54	3,55	3,6	3,62	3,4	3,9
K ₂ O	4,41	4,45	4,4	3,24	3,7	4,2	3,22	3,45	3,3
P ₂ O ₅	0,02	0,01	0,02	0,12	0,04	0,05	0,06	0,05	0,4
П.п.п	0,95	0,53	0,78	0,5	0,7	0,51	0,3	0,15	0,41
∑	99,9	99,95	100,0	99,75	99,9	99,8	100,2	100,1	100,0
Li	187,9	188,3	199,2	190,4	191,3	189,2	223,1	222,5	231,7
Cs	34,7	35,7	36,7	35,2	36,5	35,4	40,7	41,3	42,7
Rb	438	440	435,2	423,8	467	489,3	498,7	497,2	502,2
Sr	71,8	72,2	73,7	70,6	72,2	73,3	73,2	75,7	75,8
Ba	169,8	170,3	175,2	170,6	172,1	180,1	180,5	182,5	198,7
La	18,5	28,1	3,08	5,64	4,35	45,8	32,5	51,8	7,38
Ce	37,4	58,1	6,73	15,2	8,51	59,7	36,2	56,8	14,4
Pr	4,35	6,9	0,93	1,87	1,02	10,1	7,0	7,3	1,71
Nd	15,3	23,4	3,15	7,11	3,66	25,2	25,2	29,6	6,42
Sm	3,49	4,6	1,11	2,25	0,81	6,6	4,9	5,4	1,4
Eu	0,59	0,45	0,06	0,03	0,08	1,2	0,13	1,12	0,19
Gd	3,33	3,8	1,24	2,17	0,73	6,7	0,9	4,0	1,49
Tb	0,46	0,65	0,27	0,46	0,35	1,2	0,11	0,66	0,23
Dy	2,51	3,1	1,77	2,87	0,94	5,0	0,7	1,22	1,46
Ho	0,43	0,5	0,32	0,61	0,26	0,6	0,2	0,5	0,33
Er	1,04	1,42	0,98	1,88	0,63	1,4	1,1	1,4	0,93
Tm	0,14	0,23	0,16	0,34	0,14	0,4	0,2	0,3	0,17
Yb	1	1,4	1,37	1,43	1,2	3,1	3,4	8,2	4,04
Lu	0,12	0,21	0,21	0,38	0,19	0,5	0,2	0,22	0,18
Y	39,4	33,2	38,6	35,2	39,1	28,9	51,6	56,8	64,8
Zr	150	144	147	148	143	152	154	147	153
Nb	38	40	39	41	38	39,5	38,8	41	39,3
Hf	8,9	9,0	7,9	8,5	8,3	8,8	7,8	7,7	8,0
Ta	7,9	8,2	9,2	7,5	7,7	8,1	9,9	10,2	10,3
Th	11,2	9,7	10,1	12,3	11,2	12,3	14,2	14,3	16,7
U	2,1	1,6	1,9	2,4	2,8	3,1	4,4	3,9	2,9
Sc	5,3	4,8	5,1	5,0	5,1	4,8	3,9	4,0	6,4
Co	2,2	2,1	2,2	2,3	2,2	2,2	2,1	2,0	2,0
Ni	3,1	2,9	2,9	2,5	2,7	2,9	2,8	2,5	2,3
Cu	6,8	7,0	7,1	6,9	7,3	7,8	8,2	8,8	7,8
Zn	40,6	42,7	43,8	45,1	50,2	51,2	49,7	50,2	55,6
Ag	1,6	2,0	2,2	2,3	2,2	2,6	2,4	2,1	2,6
Sb	2,4	2,5	2,9	3,1	3,1	3,3	3,1	3,0	3,9
Pb	28,8	29,4	30,2	31,3	34,1	36,1	38,1	41,6	45,7

Компоненты / Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Be	31,6	30,5	31,7	33,1	35,5	38,2	40,2	43,8	65,8
V	12,8	13,0	12,9	12,5	12,5	11,3	11,1	10,3	11,9
Cr	4,6	4,8	4,7	4,2	4,0	3,8	3,3	3,3	3,2
Ga	17,5	18,1	17,8	16,2	15,8	14,8	17,7	15,0	16,9
Mo	2,1	2,8	3,0	3,3	3,6	3,3	18,6	20,3	25,8
W	7,9	8,2	8,4	9,1	10,2	10,3	11,2	12,8	19,6
Sn	30,4	29,7	30,1	30,7	31,2	33,1	33,3	36,2	44,8
F	2567	2451	2355	2260	2566	2651	2720	2810	2800
∑REE	127,96	165,0	59,98	74,4	80,78	194,5	118,24	224,3	122,0
Eu/Eu*	0,52	0,32	0,15	0,04	0,3	0,54	0,12	0,7	0,4
La/Yb _N	12,6	12,5	1,53	2,67	2,47	10,1	6,5	4,3	1,24
La/Sm _N	3,3	3,8	1,73	1,57	3,3	4,33	3,69	6,0	3,3
Nb/Ta	4,8	4,9	4,4	5,5	4,9	4,9	4,9	5,0	4,7
TE _{1,3}	1,21	1,12	1,16	1,15	1,25	1,18	0,73	0,73	0,95

Примечание: N – элементы нормированы по [McDonough, Sun, 1995]. Eu* = (SmN + GdN) / 2. TE_{1,3} – Тетрадный эффект фракционирования РЗЭ, как среднее между первой и третьей тетрадами по [Irber, 1999]. Породы Пшишского участка: 1–3 – двуслюдяные лейкограниты ранней фазы, 4–6 – лейкократовые граниты 2 фазы, 7–8 – грейзенизированные граниты, 9 – онгонит. / Note: N – elements normalized after [McDonough, Sun, 1995]. Eu* = (SmN + GdN) / 2. TE_{1,3} – tetradic effect fractionation of REE, as middle between of first and third tetrads after [Irber, 1999]. Rocks of Pshish tract: 1-3 – two mica leucogranites of early phase, 4-6 – leucocratic granites of second phase; 7-8 – greisenization granites, 9 – ongonite.

На TAS-диаграмме анализируемые породы локализируются в области кислых пород в поле гранитов, смещаясь к его ультракислой части в виде компактного роя слегка вытянутого по вектору кремнекислотности (рис. 3).

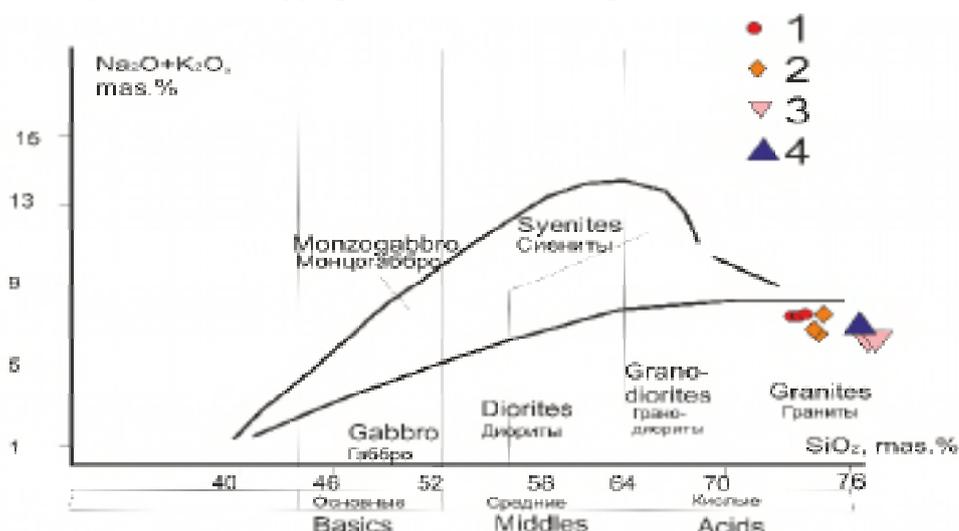


Рис. 3. Диаграмма (Na₂O+K₂O) – SiO₂ для пород Пшишского участка: 1 – двуслюдяные лейкограниты 1 фазы внедрения; 2 – лейкократовые граниты 2 фазы; 3 – грейзенизированные граниты; 4 – онгониты /

Fig. 3. Plot of (Na₂O+K₂O) – SiO₂ for rocks Pshish tract: 1 – Two mica leucogranites of first phase; 2 – leucocratic granites of second phase; 3 – greisenization granites; 4 – ongonite

Соотношение $Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O) - Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O + CaO)$ определяет анализируемые породы как пералюминиевые (рис. 4а), в то время как в координатах железистости и магнезиальности их следует относить к железистым образованиям (рис. 4б/б).

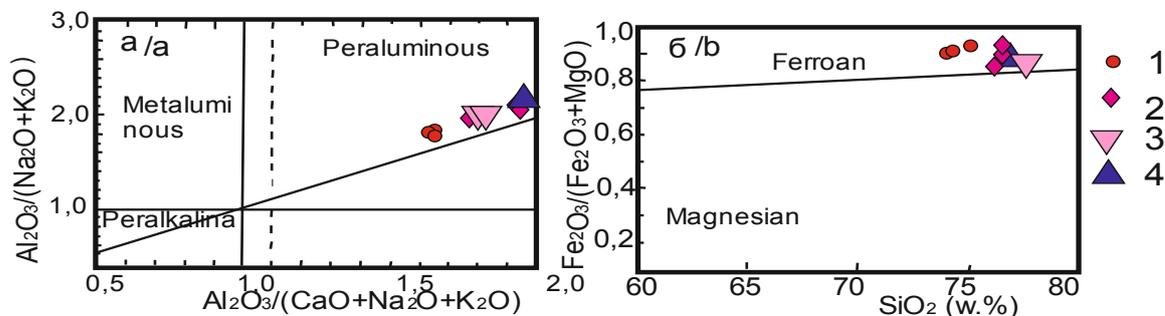


Рис. 4. Петрохимические диаграммы для породных типов Пшишского участка:
а) $Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O) - Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$ по [Maniar, Piccoli, 1989]; б) $Fe_2O_3 / (Fe_2O_3 + MgO) - SiO_2$ по [Villaseca, Barbero, 1998].

Остальные условные обозначения приведены на рисунке 3 /

Fig. 3. Petrochemical plots for rock types of Pshish tract:
а) $Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O) - Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$ по [Maniar, Piccoli, 1989];
б) $Fe_2O_3 / (Fe_2O_3 + MgO) - SiO_2$ по [Villaseca, Barbero, 1998].

Legend as in fig. 3

В координатах калия и кремнекислотности породы Пшишского участка относятся к высоко-калиевым дацитам высоко-К известково-щелочной серии пород по [Pecerrillo, Taylor, 1976].

Суммарные содержания редких земель в породах дают широкий размах значений и варьируют от 59,98 до 224,3 г/т. Отношения Eu/Eu^* также подвержены резким колебаниям (от 0,04 до 0,7) и повсеместно ниже хондритовых значений. Нормированные отношения лёгких к тяжёлым РЗЭ (La/Yb_N) весьма изменчивы, а максимальные значения указывают на сильно проявленное фракционирование РЗЭ. Возможно это связано с резкими изменениями состава магматогенных флюидов и различной активности летучих компонентов, что отразилось на проявлении обоих типов тетрадного эффекта фракционирования (ТЭФ) РЗЭ М- и W-типов (граничные значения более 1,1 и менее 0,9, соответственно).

Результаты работы и их обсуждение

Большое значение в понимании генезиса пород имеет источник плавления, за счёт которого образуются породы.

В соответствии с геохимическими данными анализируемых гранитоидов и в разрезе экспериментальных данных по плавлению различных пород пшишские лейкогранитные разности, а также грейзенизированные лейкограниты и онгониты имели источником плавления фельзические пелиты (рис. 5а, б, с). Соотношение кремнекислотности и показателя А/СНК свидетельствует о том, что источник плавления анализируемых пород близок к кратонным фанерозойским сланцам (рис. 5d).

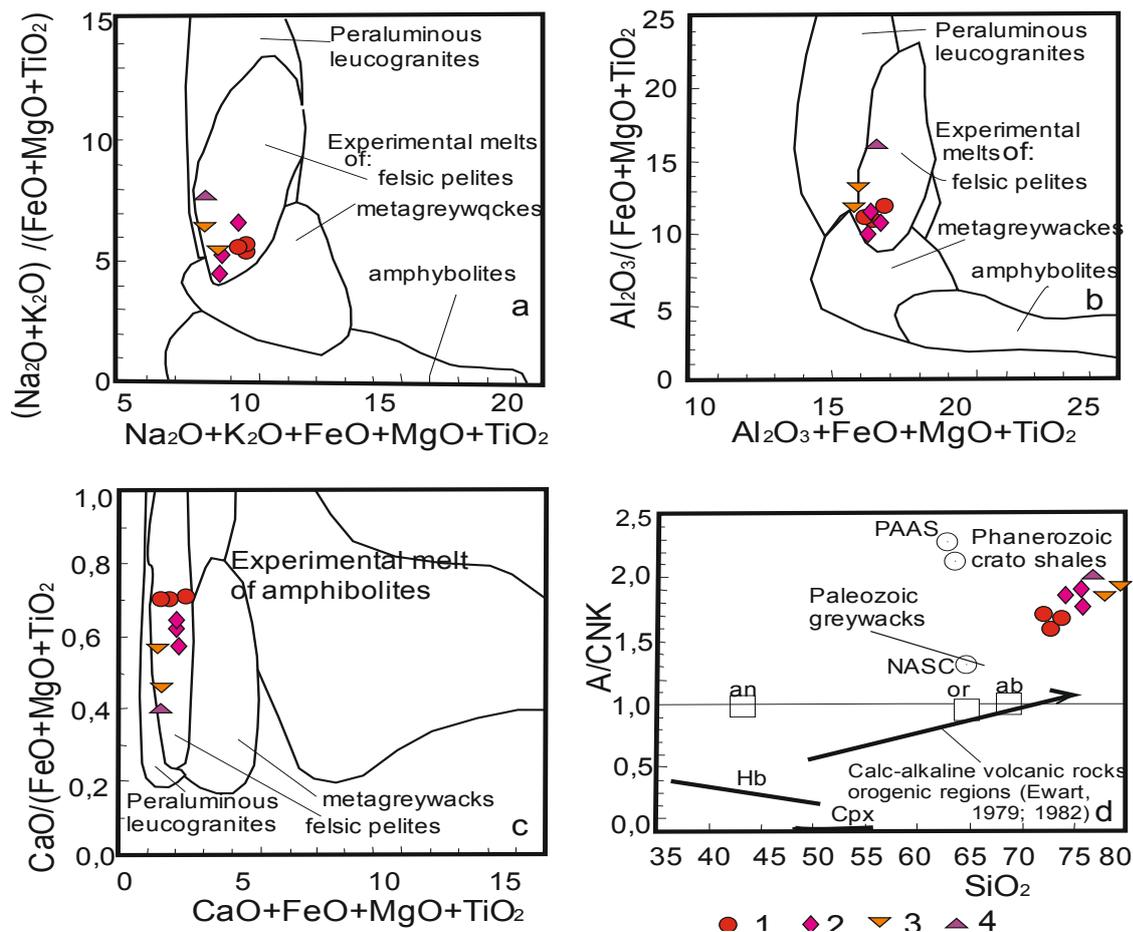


Рис. 5. Экспериментальные диаграммы: (а), (b), (с) – диаграммы композиционных экспериментальных расплавов из плавления фельзических пелитов (мусковитовых сланцев), метагравяк и амфиболитов для пород Пишишского ареала; (d) – диаграмма $SiO_2 - A/CNK$ для пород Пишишского ареала. Тренд известково-щелочного фракционирования вулканических пород орогенных регионов, по [Ewart, 1982]. A- Al_2O_3 , CNK – Сумма CaO, Na_2O , K_2O . PAAS – постархейская средняя австралийская осадочная порода; NASC – северо-американский континентальный сланец; Phanerozoic cratoshales – фанерозойские кратонные сланцы. Остальные условные обозначения на рисунке 2 /

Fig. 5. Experimental plots: (a), (b), (c) – plots of compositional experimental melts from pelites (muscovite shales), metagraywackes and amphibolites for rocks of Pschish areal; (d) – plot $SiO_2 - A/CNK$ for rocks Pschish areal. Trend of calc-alkali fractionation volcanic rocks of orogenic regions after [Ewart 1982]. A- Al_2O_3 , CNK – sum CaO, Na_2O , K_2O . PAAS – post Archean middle Australian sedimentary rock; NASC – North American shale; Phanerozoic cratoshales. Legend in fig. 2.

Также считается, что плавление источника пород, содержащих фазы Ti-обогащённых ингредиентов (рутила, ильменита) будет генерировать расплавы с высоким отношением Nb/Ta (>25), в то время как плавление источника с амфиболом приводит к формированию расплавов с более низким отношением Nb/Ta (<25) [Hoffmann et al., 2011]. В породных типах Пишишского ареала отношение Nb/Ta варьирует от 4,4 до 5,5 и не предполагает плавление титан-обогащённых источников. На серии диаграмм отчётливо видны тренды фракционирования минералов калиевого полевого шпата, плагиоклаза и роговой обманки при формировании лейкогранитоидов Пишишского участка (рис. 6а–d).

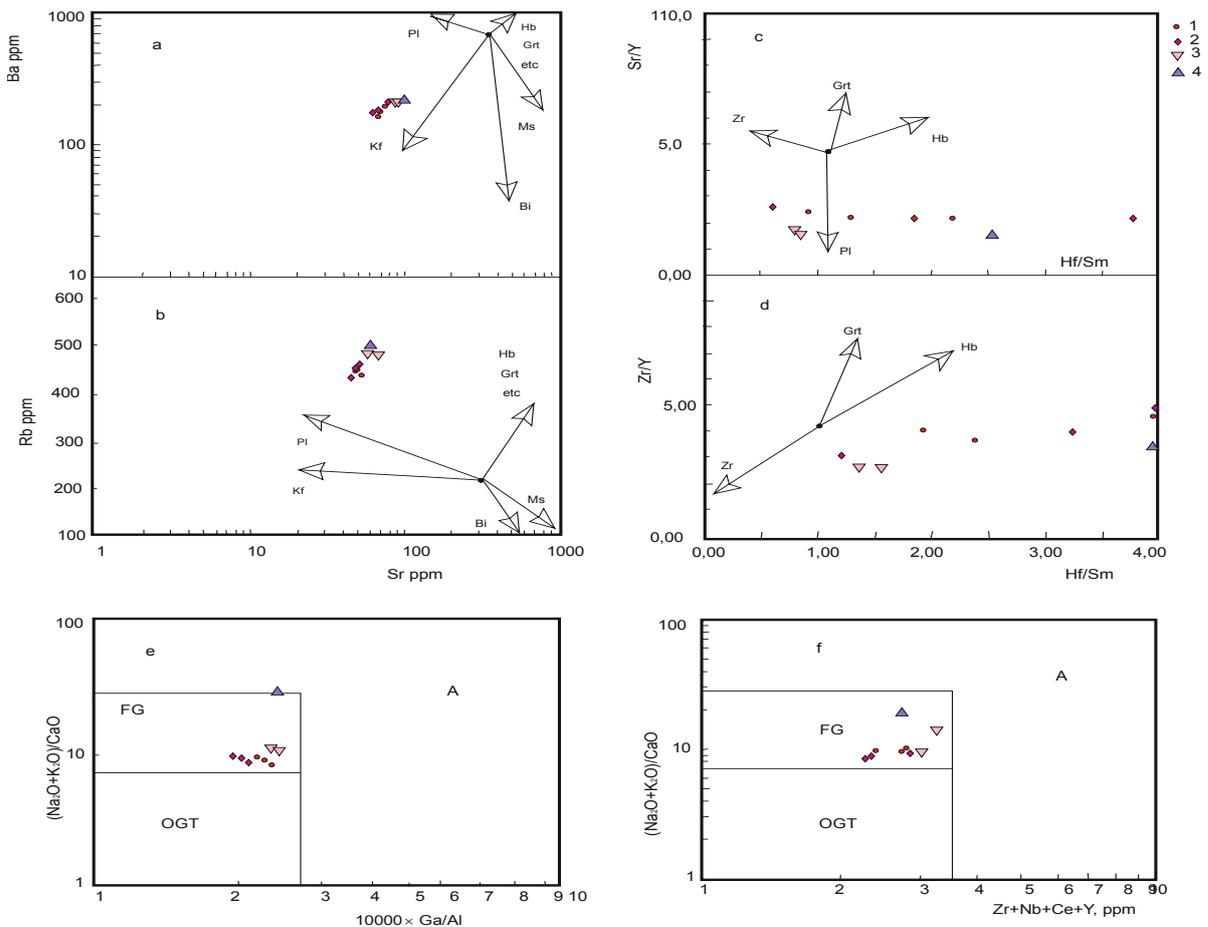


Рис. 6. Диаграммы фракционирования минералов для лейкогранитоидов Пшишского участка: а) Ba – Sr и б) Rb – Sr по [Janoušek et al., 2004]; в) Sr/Y – Hf/Sm и д) Zr/Y – Hf/Sm по [Rudnick, Gao, 2003]; е) $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO} - 10,000/\text{Ga}/\text{Al}$ и ф) $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO} - \text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ по [Whalen et al., 1987]. Поля гранитоидов: А – анорогенные, FG – фракционированные, OGT – нефракционированные M-, I- и S-типы гранитоидов /

Fig. 6. Plots of fractionation of minerals for leucogranites of Pschish areal: (a) Ba vs. Sr and (b) Rb vs. Sr diagrams [Janoušek et al., 2004]; (c) Sr/Y vs. Hf/Sm and (d) Zr/Y vs. Hf/Sm diagrams [Rudnick, Gao, 2003]; (e) $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ vs. $10,000/\text{Ga}/\text{Al}$ and (f) $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ vs. $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ diagrams [Whalen et al., 1987]. Fields of granitoids: A – anorogenic (A type), FG – fractionations, OGT – non fractionations M-, I-, S-types.

При этом на рисунках 6е и 6ф все породные типы попадают в область фракционированных гранитов.

При формировании лейкогранитоидов Пшишского ареала происходило кристалл-фракционирование не только породообразующих минералов, но и акцессориев. Наиболее заметным было фракционирование апатита, алланита и монацита, что подтверждается соотношениями $(\text{La}/\text{Yb})_N$ и La по [Fujimaki, 1986; Yurimoto et al., 1990].

В связи с такими условиями фракционирования минералов в расплаве интересно – как себя будут вести рудные компоненты? Весьма чувствительными к изменениям в расплавах являются насыщенные активными летучими компонентами магматогенные флюиды. Такую зависимость можно установить, выяснив поведение ниобия (одного из главных рудных компонентов в грейзенах Пшишского рудного поля) и проявление тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ. Для этого нами построена

диаграмма зависимости концентраций ниобия в лейкогранитоидах и численных величин ТЭФ РЗЭ в них. На диаграмме можно увидеть 2 тренда: при проявлении ТЭФ РЗЭ М-типа увеличение величины последнего происходит с уменьшением концентраций Nb, а в случае проявления ТЭФ РЗЭ W-типа – уменьшение величины последнего соответствует увеличению концентраций Nb (рис. 7).

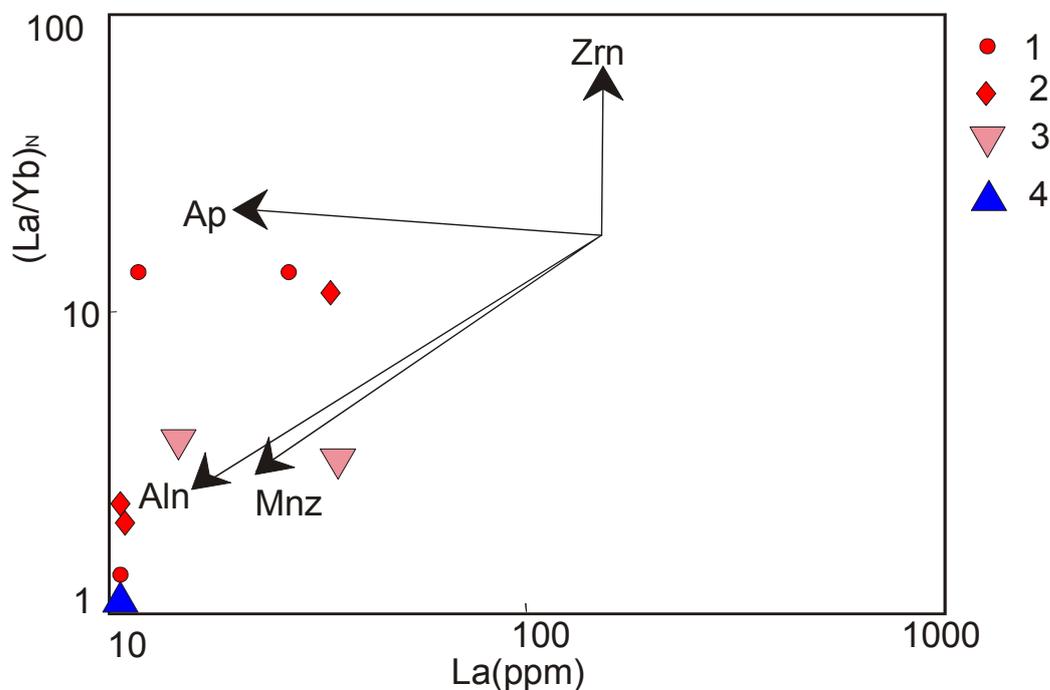


Рис. 7. Диаграмма $(La/Yb)_N - La$ по [Fujimaki, 1986; Yurimoto et al., 1990] для высокофракционированных лейкогранитов Пшишского ареала:

Тренды минералов: Zrn – циркон, Ap – апатит, Aln – алланит, Mnz – монацит /
Fig. 7. Plot $(La/Yb)_N - La$ after [Fujimaki, 1986; Yurimoto et al., 1990] for high fractionation of leucogranites of Pshish areal:

Trends of minerals: Zrn – zircon, Ap – apatite, Aln – allanite, Mnz – monazite

Установлено, что проявление ТЭФ РЗЭ W-типа в магматических породах связано с большей активностью аква-комплексов и присутствием во флюидах CO_2 , в то время как проявлению ТЭФ РЗЭ М-типа способствуют комплексы с галогенидами (F, Cl).

Проявление в лейкогранитоидах Пшишского ареала и М- и W- типов ТЭФ РЗЭ указывает на менявшийся состав и активность летучих компонентов в магматогенных флюидах, обусловленные различными физико-химическими условиями флюидной фазы. Индикатором менявшихся физико-химических условий среды во флюидах может быть отношение Eu/Eu^* , которое в анализируемых породах Пшишского ареала весьма сильно меняется (от 0,04 до 0,7). Чем больше указанное отношение, тем выше основность или щёлочность среды, согласно рядам кислотности-щёлочности А.А. Маракушева [Маракушев, 1976] для ряда элементов Sm, Gd, Eu в водно-сероводородных растворах при стандартных условиях. Следовательно, тренд изменения соотношений Eu/Eu^* и $TE_{1,3}$ для анализируемых пород указывает на то (рис. 8), что формирование лейкогранитов с проявлением ТЭФ РЗЭ М-типа происходило при повышенной щёлочности среды, а уменьшение величины ТЭФ РЗЭ W-типа связано с увеличением кислотности магматогенных флюидов.

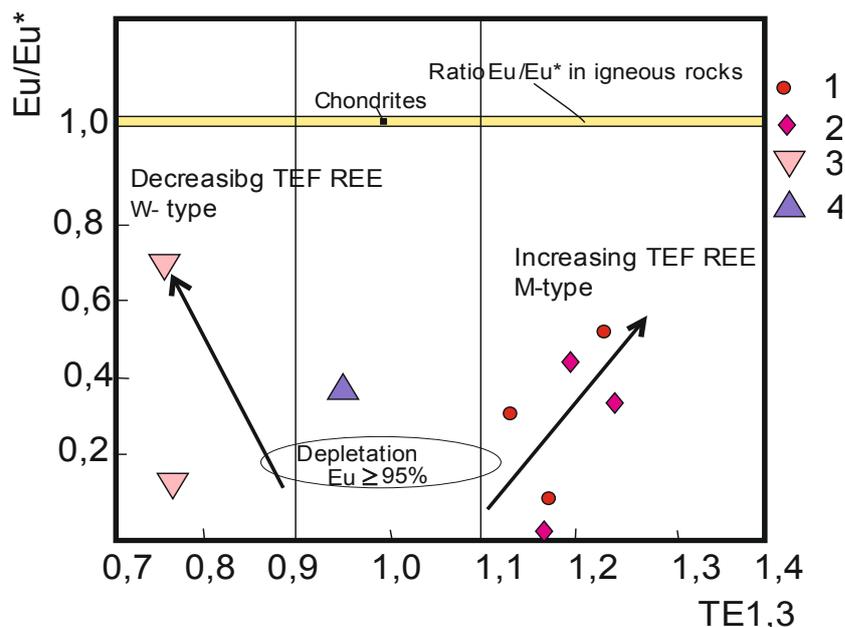


Рис. 8. Диаграмма $Eu/Eu^* - TE_{1,3}$ для породных типов Пшишского ареала:
Ratio Eu/Eu^ igneous rocks* – отношения Eu/Eu^* в изверженных породах по [Виноградов, 1962];
Chondrites – концентрации европия в хондритах по [Wasson, Kallemeyn, 1988]; *Decreasing TEF REE W-type* – уменьшение ТЭФ РЗЭ W-типа; *Increasing TEF REE M-type* – увеличение ТЭФ РЗЭ M-типа; *Depletion $Eu \geq 95\%$* – деплетирование $Eu \geq 95\%$.

Условные обозначения представлены на рисунке 2 /

Fig. 8. Plot $Eu/Eu^* - TE_{1,3}$ for rock type of Pshish areal:
Ratio Eu/Eu^ igneous rocks* after [Vinogradov, 1962]; *Chondrites* – ratio of Eu/Eu^* after [Wasson, Kallemeyn, 1988]. Legend on fig. 2

С увеличением ТЭФ РЗЭ М-типа происходило снижение концентраций Nb в породах и увеличение его во флюидной фазе, что благоприятно сказывалось на отложении рудных компонентов в грейзеновом процессе. Такой сценарий происходил в результате увеличения щёлочности среды при активной роли фтор-комплексов, переносивших рудные элементы.

С уменьшением ТЭФ РЗЭ W-типа происходило увеличение концентраций Nb и фиксация его в породах. Такой сценарий осуществлялся в условиях повышения кислотности и активной роли аква-комплексов.

Выводы

Лейкограниты, двуслюдяные лейкограниты, грейзенизированные лейкограниты и онгониты Пшишского ареала отнесены к пералюминиевым, железистым разновидностям высоко-калиевой известково-щелочной серии пород. Они формировались за счёт плавления фельзических пелитов нижней коры и их генерация осуществлялась за счёт фракционирования полевых шпатов, роговой обманки и аксессуарных минералов – апатита, алланита, монацита, что и обусловило их отнесение к высоко-фракционированным образованиям. Проявление ТЭФ РЗЭ W-типа происходило в условиях активности аква-комплексов с повышением кислотности среды и фиксации рудных компонентов (Nb, Ta, W) в породах. ТЭФ РЗЭ M-типа протекал в условиях повышения щёлочности среды при активной роли фтор-комплексов в магматогенных флюидах и отделении рудных компонентов в них, что на грейзеновом этапе приводило к формированию концентрированного оруденения редких металлов.

Литература

1. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры. // Геохимия. – 1962. – №7. – С. 555–572.
2. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Докучаев А.Я., Кондрашов И.А. Раннекиммерийские вулканоплутонические образования из района Садонской группы полиметаллических месторождений Северной Осетии: геодинамическая типизация и минерогения. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №2. – С. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2022.77.30.001
3. Гамкрелидзе И.П., Шенгелия Д.М. Докембрийско-палеозойский региональный метаморфизм, гранитоидный магматизм и геодинамика Кавказа. – М.: Научный Мир, 2005. – 464 с.
4. Маракушев А.А. Термодинамические факторы образования рудной зональности. // Термодинамические факторы образования рудной зональности скрытого оруденения на основе зональности гидротермальных месторождений. – М.: Наука, 1976. – С. 36–51.
5. Парада С.Г. Рудно-магматические системы медно-порфирирового типа Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №3. – С. 129–147. DOI: 10.46698
6. Ewart A. The mineralogy and petrology of Tertiary – Recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesitic-basaltic compositional range. // Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks. – Chichester, 1982. – pp. 25-95.
7. Gurbanov A.G., Aretz J., Lippolt H.J. The problems of genesis and age of two-feldspar granitoids of the Moshchevaya river (Northern Caucasus, C.I.S.). // *Geologica Carpathica*. – 1992. – Vol. 43. No.1. – pp. 35-40.
8. Fujimaki H. Partition coefficients of Hf, Zr, and REE between zircon, apatite, and Liquid. // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1986. – Vol. 94. – pp. 42–44.
9. Hoffmann J.E., Münker C., Næraa T., Rosing M.T., Herwartz D., Garbe-Schönberg D., Svahnberg H. Mechanisms of Archean crust formation inferred from high-precision HFSE systematics in TTGs. // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2011. – Vol. 75. – pp. 4157–4178.
10. Hu G.Y., Zeng L.S., Gao L.-E., Liu Q.P., Chen H., Guo Y.S. Diverse magmasources for the Himalayan leucogranites: evidence from B-Sr-Nd isotopes. // *Lithos*. – 2018. – Vol. 314–315. – pp. 88–99.
11. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. // *Geochim Cosmochim Acta*. – 1999. – Vol. 63. No.3/4. – pp. 489-508.
12. Janoušek V., Finger F., Roberts M., Fryida, J., Pin C., Dolejš D. Deciphering the petrogenesis of deeply buried granites: whole-rock geochemical constraints on the origin of largely undepleted felsic granulites from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif. // *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* – 2004. – Vol. 389. – pp. 141–159.
13. Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids. // *Geological Soc. America Bulletin*. – 1989. – Vol. 101. – pp. 635–643.
14. McDonough W.F., Sun S. The composition of the Earth. // *Chem. Geol.* – 1995. – Vol. 120. No.1(3-4). – pp. 223-253.
15. Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1976. – Vol. 58. – pp. 63-81.
16. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust. // *Treatise Geochem.* – 2003. – Vol. 3. – pp. 1–64.
17. Vigneresse J.L. The role of discontinuous magma inputs in felsic magma and ore generation. // *Ore geology Reviews*. – 2007. – Vol. 30. – pp. 181-216.
18. Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A reexamination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts. // *Trans. of Royal Soc. of Edinburgh Earth Science*. – 1998. – Vol. 89. – pp. 113–119.
19. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Composition of chondrites. // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* – 1988. – Vol. 201. – pp. 535-544.

20. Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. // *Contrib. Miner. Petrol.*, 1987. – Vol. 95. – pp. 407–419.
21. Wu F.Y., Liu X.C., Ji W.Q., Wang J.M., Yang L. Highly fractionated granites: Recognition and research. // *Sci. China Earth Sci.* – 2017. – Vol. 60. – pp. 1201–1219. DOI: 10.1007/s11430-016-5139-1
22. Yurimoto H., Duke E.F., Papike J.J., Shearer C.K. Are discontinuous hondrite normalized REE patterns in pegmatitic granite systems the results of monazite fractionation? // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1990. – Vol. 54. – pp. 2141–2145.
23. Zeng L.S., Gao L.E., Xie K.J., Zeng-Liu J. Mid-Eocene high Sr/Y granites in the Northern Himalayan Gneiss Domes: melting thickened lower continental crust. // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2011. – Vol. 303(3-4). – pp. 251–266.
24. Zhang L.X., Wang Q., Zhu D.C., Li S.M., Zhao Z.D., Zhang L.L., Chen Y., Liu S.A., Zheng Y.C., Wang R., Liao Z.L. Generation of leucogranites via fractional crystallization: a case from the Late Triassic Luoza batholith in the Lhasa Terrane, southern Tibet. // *Gondwana Res.* – 2019. – Vol. 66. – pp. 63–76.

References

1. Vinogradov A.P. Average contents of chemical elements in the main types of igneous rocks of the Earth's crust. *Geochemistry*. 1962. No. 7. pp. 555–572. (In Russ.)
2. 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. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 6–18. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.77.30.001
3. Gamkrelidze I.P., Shengelia D.M. Precambrian-Paleozoic regional metamorphism, granitoid magmatism and geodynamics of the Caucasus. Moscow. Nauchnyy Mir. 2005. 464 p. (In Russ.)
4. Marakushev A.A. Thermodynamic factors of ore zoning formation. Thermodynamic factors of formation of ore zonality of blind ore body based on zonality of hydrothermal deposits. Moscow. Nauka. 1976. pp. 36–51. (In Russ.)
5. Parada S.G. Ore-magmatic systems of the copper-porphyry type of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11 No. 3. pp. 129–147. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.73.74.011.
6. Ewart A. The mineralogy and petrology of Tertiary – Recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesitic-basaltic compositional range. *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. Chichester, 1982. pp. 25–95.
7. Gurbanov A.G., Aretz J., Lippolt H.J. The problems of genesis and age of two-feldspar granitoids of the Moshchevaya river (Northern Caucasus, C.I.S.). *Geologica Carpathica*. 1992. Vol. 43. No.1. pp. 35–40.
8. Fujimaki H. Partition coefficients of Hf, Zr, and REE between zircon, apatite, and Liquid. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1986. Vol. 94. pp. 42–44.
9. Hoffmann J.E., Münker C., Næraa T., Rosing M.T., Herwartz D., Garbe-Schönberg D., Svahnberg H. Mechanisms of Archean crust formation inferred from high-precision HFSE systematics in TTGs. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2011. Vol. 75. pp. 4157–4178.
10. Hu G.Y., Zeng L.S., Gao L.-E., Liu Q.P., Chen H., Guo Y.S. Diverse magmasources for the Himalayan leucogranites: evidence from B-Sr-Nd isotopes. *Lithos*. 2018. Vol. 314–315. pp. 88–99.
11. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochim Cosmochim Acta*. 1999. Vol. 63. No.3/4. pp. 489–508.
12. Janoušek V., Finger F., Roberts M., Fryida, J., Pin C., Dolejš D. Deciphering the petrogenesis of deeply buried granites: whole-rock geochemical constraints on the origin of largely undepleted felsic granulites from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 2004. Vol. 389. pp. 141–159.

13. Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Soc. America Bulletin*. 1989. Vol. 101. pp. 635–643.
14. McDonough W.F., Sun S. The composition of the Earth. *Chem. Geol.* 1995. Vol. 120. Issues 3–4. pp. 223–253. DOI: 10.1016/0009-2541(94)00140-4.
15. Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastomonon area, northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1976. Vol. 58. pp. 63–81.
16. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust. *Treatise Geochem.* 2003. Vol. 3. pp. 1–64.
17. Vigneresse J.L. The role of discontinuous magma inputs in felsic magma and ore generation. *Ore geology Reviews*. 2007. Vol. 30. pp. 181–216.
18. Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A reexamination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts. *Trans. of Royal Soc. of Edinburg Earth Science*. 1998. Vol. 89. pp. 113–119.
19. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Composition of chondrites. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1988. Vol. 201. pp. 535–544.
20. Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Miner. Petrol.*, 1987. Vol. 95. pp. 407–419.
21. Wu F.Y., Liu X.C., Ji W.Q., Wang J.M., Yang L. Highly fractionated granites: Recognition and research. *Sci. China Earth Sci.* 2017. Vol. 60, pp. 1201–1219. DOI: 10.1007/s11430-016-5139-1.
22. Yurimoto H., Duke E.F., Papike J.J., Shearer C.K. Are discontinuous hondrite normalized REE patterns in pegmatitic granite systems the results of monazite fractionation? *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1990. Vol. 54. pp. 2141–2145.
23. Zeng L.S., Gao L.E., Xie K.J., Zeng-Liu J. Mid-Eocene high Sr/Y granites in the Northern Himalayan Gneiss Domes: melting thickened lower continental crust. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2011. Vol. 303. Issues 3–4. pp. 251–266.
24. Zhang L.X., Wang Q., Zhu D.C., Li S.M., Zhao Z.D., Zhang L.L., Chen Y., Liu S.A., Zheng Y.C., Wang R., Liao Z.L. Generation of leucogranites via fractional crystallization: a case from the Late Triassic Luoza batholith in the Lhasa Terrane, southern Tibet. *Gondwana Res.* 2019. Vol. 66. pp. 63–76.

УДК 553:491:550.85:550.4:549.271.3(470.6)

DOI: [10.46698/VNC.2023.14.73.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.14.73.008)

Оригинальная статья

Платина и платиноиды в палеозойских черносланцевых толщах Передового хребта (Северный Кавказ)

С.Г. Парада 

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

Статья поступила: 31.01.2023, доработана: 02.03.2023, одобрена в печать: 06.03.2023

Резюме: Актуальность работы. Определяется необходимостью обобщения полученных ранее данных о содержаниях и минеральных формах платины и платиноидов в средне-верхнедевонских черносланцевых толщах структурно-формационной зоны Передового хребта. **Цель работы.** Собрать, обобщить и проанализировать фондовые и опубликованные данные о наличии минеральных форм и содержаниях платины и платиноидов в средне-верхнедевонских черносланцевых толщах зоны Передового хребта и в пределах площадей их развития. **Методы работы.** Анализ результатов ранее проведенных работ и опубликованных данных, полевая документация, отбор проб, изучение шлифов и аншлифов, определение в пробах содержаний Pt и Pd пробирным методом с ИСП-АЭС окончанием. **Результаты работы.** Установлены минеральные формы платины и платиноидов в аллювии дренирующих черносланцевые толщи рек. Выявленные в начале прошлого столетия содержания самородной платины в аллювии реки Власинчихи могут соответствовать по современным кондициям россыпному месторождению. Анализ результатов ранее проведенных определений содержаний Pt и Pd в черносланцевых породах андрюкской свиты, достигающих десятых долей г/т, вызывает сомнение в их достоверности, так как в публикациях не указаны способы отбора и подготовки проб к анализу, не указана также модификация примененного метода атомно-абсорбционной спектроскопии. Полученные нами в специализированной лаборатории результаты определения Pt и Pd в черносланцевых породах артыкчакской свиты составляют сотые доли г/т, подтверждены многофакторным контролем, и расцениваются как повышенные (надкларковые) содержания. В единичных случаях сумма Pt и Pd достигала 0,1 г/т, что является субпромышленным содержанием. Минераграфические исследования позволили установить наличие выделений самородной платины непосредственно в черносланцевой породе. Приуроченность таких выделений к перемещенным формам углеродистого вещества и к новообразованиям хромовой слюдки (фукситу) гидротермального генезиса заставляют предположить эпигенетическое происхождение выявленных минеральных форм платины за счет метаморфогенного перераспределения рудообразующих элементов ультраосновного петрофонда.

Ключевые слова: платина, палладий, черные сланцы, минераграфия, Передовой хребет, Северный Кавказ.

Благодарности: Статья подготовлена в рамках государственного задания на научно-исследовательские работы Геофизического института ВНЦ РАН.

Для цитирования: Парада С.Г. Платина и платиноиды в палеозойских черносланцевых толщах Передового хребта (Северный Кавказ). *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(1): 112-124. DOI: 10.46698/VNC.2023.14.73.008.

DOI: [10.46698/VNC.2023.14.73.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.14.73.008)

Original paper

Platinum and platinoids in Paleozoic Black shale strata Front ridge (North Caucasus)

S.G. Parada 

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

Received: 31.01.2023, revised: 02.03.2022, accepted: 06.06.2023

Abstract: Relevance. It is determined by the need to generalize the previously obtained data on the contents and mineral forms of platinum and platinoids in the Middle-Upper Devonian black shale strata of the structural-formation zone of the Front Ridge. **Aim.** To collect, summarize and analyze stock and published data on the presence of mineral forms and the contents of platinum and platinoids in the Middle-Upper Devonian black shale strata of the zone of the Front Ridge and within the areas of their development. **Methods.** Analysis of the results of previously carried out works and published data, field documentation, sampling, study of cuts and anshlifs, determination of Pt and Pd contents in samples by assay method with ICP-NPP completion. **Results.** Mineral forms of platinum and platinoids have been established in the alluvium of draining black shale strata of rivers. The contents of native platinum detected at the beginning of the last century in the alluvium of the Vlasinchikha River may correspond to the placer deposit in modern conditions. Analysis of the results of earlier determinations of Pt and Pd contents in the black shale rocks of the Andriuk formation, reaching tenths of a g/t, raise doubts about their reliability, since the publications do not specify methods of sampling and preparation of samples for analysis, nor does the modification of the applied method of atomic absorption spectroscopy. The results obtained by us in a specialized laboratory for the determination of Pt and Pd in the black shale rocks of the Artykchak formation are hundredths of a g/t, confirmed by multifactorial control, and are regarded as elevated (overclark) contents. In isolated cases, the sum of Pt and Pd reached 0.1 g/t, which is a sub-industrial content. Mineralogical studies have made it possible to establish the presence of native platinum secretions directly in the black shale rock. The fact that such secretions are confined to displaced forms of carbonaceous matter and to new formations of chrome mica (fuchsite) of hydrothermal genesis suggests the epigenetic origin of the identified mineral forms of platinum due to metamorphogenic redistribution of ore-forming elements of the ultrabasic petrofund.

Keywords: platinum, palladium, black shales, minerography, Advanced ridge, North Caucasus.

Acknowledgements: The article was prepared as part of the state assignment for research work of the Geophysical Institute of the VNC RAS.

For citation: Parada S.G. Platinum and platinoids in Paleozoic Black Shale strata of the Front Ridge (North Caucasus). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(1): 112-124. DOI: 10.46698/VNC.2023.14.73.008.

Введение

Наличие включений минеральных форм платины и платиноидов в черносланцевых (углеродисто-терригенных) толщах не является чем-то необычным. Так, например, в золоторудном месторождении черносланцевого типа Сухой Лог (Иркутская область) при проведении детальных минералогических исследований были обнаружены самородная платина, изоферроплатина, туламинит, сперрилит и другие минералы платины и палладия с размером частиц

1–10 мкм [Дистлер и др., 1996, Distler et al., 2003, 2004]. Также была доказана связь минералов платины и платиноидов с рассеянным углеродистым веществом [Clark, Criddle, 1982; Fleet et al., 2002; Cabri et al., 2022]. Для этого из обогащенных минералами платины черных сланцев были получены концентраты углеродистого вещества, в которых химическим путем определены содержания платины от 300 до 1000 г/т [Razvozzhaeva et al., 2002]. По результатам химических анализов платина отмечается в углеродистых стратифицированных комплексах Воронежской провинции [Чернышов, Коробкина, 1995]. Видимые под микроскопом платиноиды были обнаружены в черносланцевых толщах Буреинского массива (Хабаровский край и Еврейская АО) [Ханчук и др., 2009], в графитистых сланцах северной части Ханкайского террейна (Приморский край) [Ханчук и др., 2013], в графитсодержащих породах района графитового месторождения Люмао (Китай) [Ханчук и др., 2017], а также в углеродисто-терригенных породах других регионов. Черносланцевые толщи широко распространены и на Северном Кавказе. Исследования их металлоносности посвящены, в основном оценке перспектив обнаружения в них золоторудных месторождений. Изучение платиноносности носит спорадический характер. В связи с этим возникает необходимость обобщения полученных ранее данных и определения возможных направлений дальнейших исследований.

Материалы и методы

В качестве исходных материалов использованы данные из геологических отчетов, опубликованных работ и результаты собственных полевых и лабораторных исследований автора. Основными методами настоящего исследования являлись анализ результатов ранее проведенных работ и опубликованных данных, полевой документации геологических объектов, отбор дубликатов бороздовых проб ультрабазитов и черносланцевых пород из горных выработок, пройденных ранее ООО «Каббалкгеология», изготовление шлифов и аншлифов, определение в пробах содержаний платины и палладия. Согласно проведенному исследованию [Парада, Гамбург, 2022], для получения надежных результатов определения металлов платиновой группы анализы следует делать в специализированной лаборатории, в которой отработана методика по исключению влияния на результат матричных элементов. В качестве таковой была определена специализированная сертифицированная по международным стандартам лаборатория ООО «Стюарт Геокемикл энд Эссей» (г. Москва). Анализы Pd и Pt осуществлялись методом пробирной плавки с ИСП-АЭС окончанием, предел обнаружения 1 мг/т.

Результаты работы и их обсуждение

Минеральные формы платины и платиноидов обнаружены и на Северном Кавказе в районах развития палеозойских черносланцевых толщ в пределах структурно-формационной зоны Передового хребта. Так, при разведке золотоносной россыпи реки Власинчихи (Урупо-Лабинский медно-рудный район), дренирующей черносланцевую толщу средне-верхнедевонского возраста (андрюкская свита), кроме золота была обнаружена самородная платина, содержания которой по результатам валового опробования аллювия, составили от 34 до 670 мг/м³ (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Результаты валовой промывки на бутаре аллювия р. Власинчихи,
выполненной Урупской поисковой партией № 1 в 1934 году /
Results of the gross washing on the alluvium tank of the Vlasenchikha river,
carried out by the Urup search party No. 1 in 1934**

№ п/п / No	Расстояние от устья р. Власинчихи и место взятия пробы / Distance from the mouth of the river. Vlasinchikha and sampling site	Дата опробования / Date of testing	Объем промытой породы, куб. м / Volume of the washed rock, m ³	Количество полученного металла, мг / Amount of the obtained metal, mg		Содержание металла в мг/куб. м с учетом коэффициента разрыхления 1,15 и валунистости 15% / Metal content in mg/ m ³ considering the loosening coefficient of 1.15 and the boulder content of 15%	
				Au	Pt	Au	Pt
1	1000 м, коса / 1000 m, bay-bar	23.04.34	3,0	2135	120	695	39
2	2000 м, коса / 2000 m, bay-bar	05.05.34	1,0	752	35	734	34
3	2800 м, коса / 2800 m, bay-bar	13.05.34	1,5	1985	370	1221	227
4	4700 м, коса / 4700 m, bay-bar	14.05.34	1,5	1460	330	898	203
5	6620 м, коса / 6620 m, bay-bar	17.05.34	1,6	1783	440	1087	253
6	4900 м, коса / 4900 m, bay-bar	17.05.34	1,0	795	125	731	115
7	4000 м, борт / 4000 m, side	19.05.34	1,0	660	152	607	140
8	3500 м, коса / 3500 m, bay-bar	19.05.34	1,5	1935	780	1265	510
9	6600 м, коса / 6600 m, bay-bar	20.05.34	1,25	1300	100	1014	78
10	3600 м, борт/3600 m, side	20.05.34	1,0	765	160	774	156
11	7200 м, борт / 7200 m, side	21.05.34	1,15	265	100	215	85

Шлиховое опробование аллювия реки Большой Лабы и ее притоков, дренирующих черносланцевые толщи андрюкской свиты, позволило обнаружить и изучить частицы платины и платиноидов. Для самородной платины характерна шарообразная форма, для платиноидов, представленных осмистым иридием и рутениридосмином, более характерны таблитчатая и пластинчатая формы (рис. 1).



Рис. 1. Платина и платиноиды из аллювия р. Большая Лаба: а) самородная платина, диаметр зерен 0,02-0,3 мм; б) осмистый иридий, диаметр зерен 0,08-0,22 мм; в) рутениридосмин, размер самой крупной пластинки 1,4 мм (по данным [Богущ и др., 2010, 2017; Богущ, Рябов, 2011]) /

Fig. 1. Platinum and platinumoids from alluvium of the Bolshaya Laba river: a) native platinum, grain diameter 0.02-0.3 mm; b) osmic iridium, grain diameter 0.08-0.22 mm; c) rutheniridosmin, the size of the largest plate 1.4 mm (according to [Bogush et al., 2010, 2017; Bogush, Ryabov, 2011])

Источником платины в аллювии указанных рек можно считать скопления хромшпинелидовой минерализации в серпентинизированных дунитах (рис. 2) Беденского и других массивов протерозойского уллу-таллыкольского гипербазитового комплекса Передового хребта, в том числе даек и силлов восточной его части. Области развития гипербазитов этого комплекса сопровождаются аномально повышенными содержаниями хрома и никеля во вторичных ореолах, повсеместным присутствием в потоках рассеяния хромита и пикотита, находками обломков хромшпинелидовых шлифов, содержащих платину, а также результатами определения платины и палладия во вторичных ореолах рассеяния Беденского массива и восточного погружения зоны Передового хребта [Парада, 2017; Богущ и др., 2021].



Рис. 2. Выходы серпентинизированного дунита (а) и формы выделения хромшпинелидов (черное) в аподуните (б) в составе апогартсбургитов Беденского массива (фото Парады С.Г.) /

Fig. 2. The outputs of serpentinized dunite (a) and the forms of chromspinelides (black) in apodunite (b) as part of the apogartsburgites of the Bedene massif (photo Parades S.G.)

Однако ультраосновными породами источники благородных металлов в россыпях не ограничиваются. И.А. Богущ и В.И. Черкашин считают, что, кроме серпентинитов, источником золота и платины могут быть черносланцевые породы различного возраста [Богущ, Черкашин, 2019].

Как бы то ни было, приведенные данные являются прямым признаком возможной платиноносности геологических формаций Передового хребта. Более всего, в этом отношении изучены потенциально рудоносные черносланцевые толщи средне-позднедевонского возраста в составе так называемого Тоханского покрова.

Средне-верхнедевонские черносланцевые толщи выходят в бассейне верхних течений рек Большой Лабы и Урупа, где объединены в составе андрюкской свиты, и в районе восточного погружения зоны Передового хребта в верховьях правых притоков реки Джуарген, где объединены в составе артыкчатской свиты, являющейся литолого-стратиграфическим аналогом андрюкской свиты.

В работе [Богущ и др., 2016] выполнен анализ на золото, платину и палладий двух групп проб, отобранных из черносланцевого комплекса Урупо-Лабинского района. Указывается, что анализы были выполнены в лаборатории физико-химических исследований Института геологии Дагестанского научного центра РАН атомно-абсорбционным методом. Первая группа проб отобрана, судя по приведенной схеме, по простиранию минерализованной зоны тектонического контакта дайки лейкократового гранита и черных сланцев андрюкской (бахмутской) свиты с разнообразной сульфидной минерализацией в балке Грушова. Из приведенных описаний становится ясно, что это эпигенетическая минерализация. По результатам анализа 27 проб содержания Pt и Pd составили от сотых до десятых долей г/т. При этом средние содержания для каждого элемента оказались практически одинаковыми, – от 0,3 до 0,34 г/т. Следует согласиться с авторами, что в сумме эти металлы представлены субпромышленными концентрациями. Однако связь с черносланцевой толщей и достоверность определения содержаний вызывает сомнение.

Вторая группа из 11-ти проб взята из обнажений черных сланцев этой же свиты балки Бахмутка Урупского района. Здесь результаты анализов примерно такие же, – содержания Pt и Pd – от сотых до десятых долей г/т. Факт близости результатов анализов проб из зоны с эпигенетической сульфидной минерализацией с результатами анализов проб из черных сланцев без признаков наложенной минерализации, заставляет задуматься о соответствии поставленной задаче примененного метода анализа. Тем не менее, авторы предлагают рассматривать девонские углеродсодержащие толщи в качестве нового перспективного источника промышленных рудных объектов.

В последующих своих публикациях авторы развивали и дополняли свою идею на основе охарактеризованных выше анализов по балкам Грушевой и Бахмутке. Других анализов они не приводят.

В статье [Богущ и др., 2020] приведены результаты анализа 21 пробы девонских черных сланцев, являющихся цокольным структурным этажом Чучкурского рудного поля. Выполнены они, как и в предыдущей статье, атомно-абсорбционным методом в лаборатории физико-химических исследований Института геологии Дагестанского научного центра РАН. Содержания Pt составили от 0,17 до 0,9 г/т, Pd – от 0,2 до 0,45 г/т. Однако в статье сами результаты анализов не приводятся. Это настораживает и заставляет усомниться в достоверности приведенных результатов.

Использованный для получения вышеописанных результатов метод атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) характеризуется определенными недостатками в отношении благородных металлов, одним из которых является узкий диапазон линейности и, соответственно, необходимость концентрирования или разбавления раствора перед измерением, а также влиянием матричных элементов пробы, спектральные линии которых близки аналитическим линиям определяемых элементов. Избавление от такого влияния под силу лишь специализированным лабораториям,

при этом сильно усложняется и становится дороже определение благородных металлов. Поэтому более надежным подтверждением платиноносности черносланцевых толщ является визуальное обнаружение минеральных форм платины.

Выполненные Н.В. Глазыриной [Глазырина, 2006] петрографические и минералогические исследования черносланцевых пород андрюкской свиты позволили обнаружить в сланцах эпигенетические рудные минерализации, в том числе и платину. Преобладающими оказались минералы кобальта и никеля, реже отмечался хромсодержащий мусковит (фуксит), что в совокупности подтверждает формирование минералого-геохимической специализации отложений андрюкской свиты за счет ультрабазитового петрофонда и эпигенетическое перераспределение рудообразующих элементов.

Установлено, что фоновая для андрюкской свиты кобальтин-пентландит-пирротинная парагенетическая ассоциация имеет метаморфогенное происхождение [Глазырина, Глазырин, 2006, 2011]. Обнаруженные в этих породах микрозерна платины, диагностируемые по ярко-белому цвету и высокому отражению [Глазырина, 2006], также могут иметь эпигенетическое происхождение. Так, единичные зерна самородной платины выделяются в пластах гравелитов с метаморфогенной кобальтин-пентландит-пирротинной ассоциацией и полным замещением этой минерализацией осадочно-диагенетического фрамбоидального пирита. Здесь платина отмечается в виде микрозерен округлой полигональной формы размером до 0,005 мм (рис. 3а). Они, приурочены к цементу гравелита и выделяются вдоль межзерновых границ метаморфогенных алюмосиликатов, которые промаркированы обильными газово-жидкими включениями.

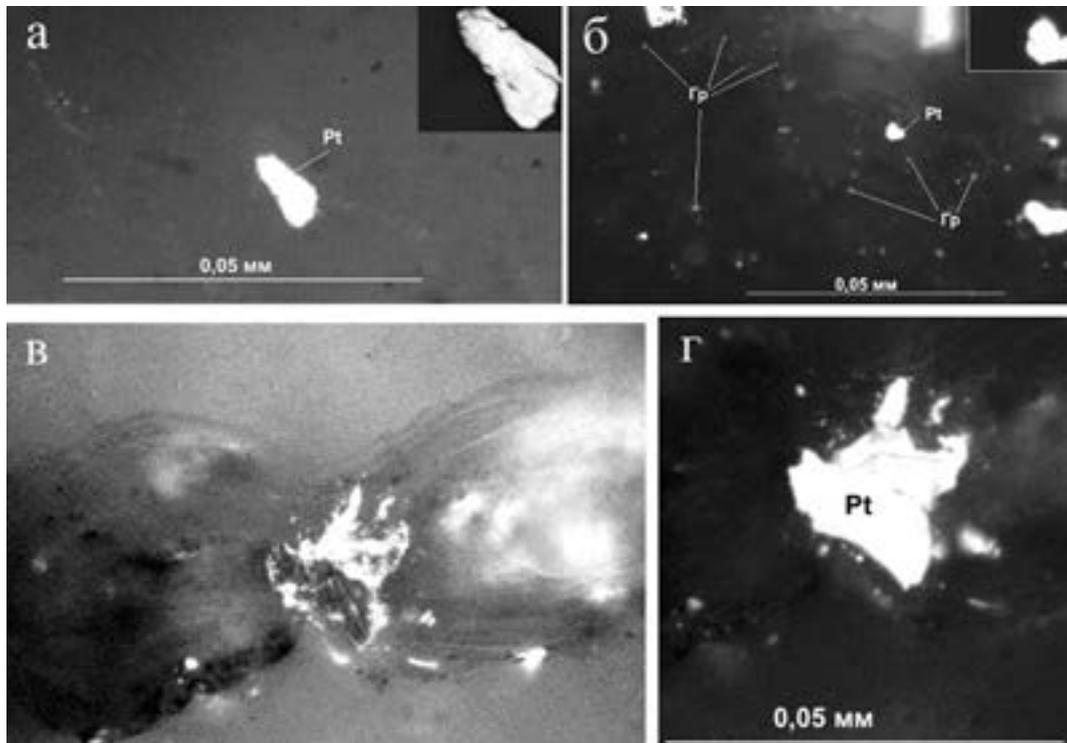


Рис. 3. Выделения самородной платины (Pt): а) – пластинчатого строения по межзерновой границе, промаркированной газово-жидкими включениями; б) самородная платина в ореоле рассеянного углеродистого вещества (Gr); в) выделение самородной платины в ассоциации с фукситом (в скрещенных николях); г) то же самое в параллельных николях (по Н.В.Глазыриной [2006]) /

Fig. 3. Isolation of native platinum (Pt): a) – lamellar structure along the intergranular boundary marked with gas-liquid inclusions; b) native platinum in the halo of a dispersed carbonaceous substance (Gr); c) isolation of native platinum in association with fuchsite (in crossed nichols); d) the same in parallel nichols (according to N.V.Glazyrina [2006])

Самородная платина также отмечена в слойке полисульфидно-силикатных псевдоморфоз по фрамбоидальному пириту. Она выделяется в виде сростка субизометричных микрозерен, который тесно ассоциирует с ореолом рассеянного углеродистого вещества (рис. 3б). В лиственитизированных породах с кобальт-никелевой сульфоарсенид-антимонидной минерализацией отмечены более крупные выделения сростков самородной платины размером около 0,2 мм. При этом, сростки платины локализуются в цементе гравелитов, сложенном вторичным минералом гидротермального происхождения – фукситом (рис. 3в, г).

Нами обращено внимание на еще один район проявления углеродистых пород средне-позднедевонского возраста в составе артыкчакской свиты в восточной оконечности формаций Передового хребта. Эта свита по результатам ГДП 200 является литолого-стратиграфическим аналогом андрюкской свиты. Черносланцевые породы артыкчакской свиты отмечаются на северном фланге Тырныаузского рудного узла, в пределах которого выявлены золоторудные проявления, в связи с чем вызывают повышенный интерес как один из возможных источников золота и ЭПГ в рудах.

Из проанализированных нами 120 дубликатов бороздовых проб в 16 пробах обнаружены повышенные (надкларковые) содержания палладия и платины (табл. 2). Они установлены в углеродистых филлитах из расчистки №13 и канавы №29. Повышенные до сотых долей г/т содержания платины и палладия на интервале не менее 9 м обнаружены в углеродистых алевролитах расчистки №6 (рис. 4). В расположенных севернее конгломератах с галькой лиственитизированных серпентинитов таких содержаний не отмечено, хотя фон в целом повышенный.

Таблица 2 / Table 2

Результаты анализов дубликатов проб из горных выработок ООО «Каббалкгеология», в которых установлены повышенные содержания Pd и Pt / The results of analyses of duplicate samples from the mine workings of «Kabbalkgeologiya» LLC, in which elevated Pd and Pt contents were found

№№ проб / No.of samples	Материал пробы / Sample material	Au	Pd	Pt
P-13-1	Углеродистый филлит / Carbonaceous phyllite	3	25	14
P-13-2	то же самое / the same	17	26	14
P-13-3	- « -	4	5	18
P-13-11	- « -	5	4	11
K-18-5	Лиственит /Listvenite	15	99	38
K-18-7	то же самое / the same	7	61	48
K-18-9	- « -	3	77	72
K-18-11	- « -	6	40	56
K-29-40	Углеродистый филлит / Carbonaceous phyllite	3	9	13
K-29-41	то же самое / the same	5	7	11
K-29-42	- « -	3	8	11
P-6-5	Углеродистый алевролит / Carbonaceous siltstone	<2	11	13
P-6-7	то же самое / thesame	6	10	22
P-6-10	- « -	4	8	18
P-6-12	- « -	2	11	19
P-6-14	- « -	4	7	12

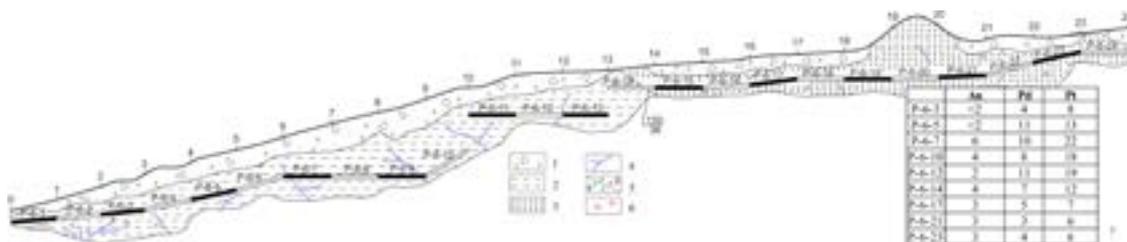


Рис. 4. Результаты геологической документации и опробования на Au, Pt и Pd расчистки № 6, пройденной в восточной части Передового хребта: 1 – элювиально-делювиальные отложения; 2 – углеродистые алевролиты; 3 – конгломераты; 4 – кварцевые жилы и прожилки; 5 – вкрапленность малахита (а) и лимонита (б); 6 – вкрапленность сульфидов; 7 – таблица результатов анализов на Au, Pt и Pd в мг/т /

Fig. 4. Results of geological documentation and testing on Au, Pt and Pd of clearing No. 6, passed in the eastern part of the Forward Ridge: 1 – eluvial-deluvial deposits; 2 – carbonaceous siltstones; 3 – conglomerates; 4 – quartz veins and veins; 5 – inclusions of malachite (a) and limonite (b); 6 – sulfide inclusions; 7 – table of analysis results for Au, Pt and Pd in mg/t

Наиболее высокие содержания платины и палладия получены по канаве 18 (табл. 2), где сумма этих элементов превысила 0,1 г/т, что является субпромышленной концентрацией. Эти пробы представляют лиственитизированную дайку апогарцбургитовых серпентинитов. Наличие платины в охарактеризованной дайке подтверждается и минералогически при исследовании шлифов и аншлифов (рис. 5).

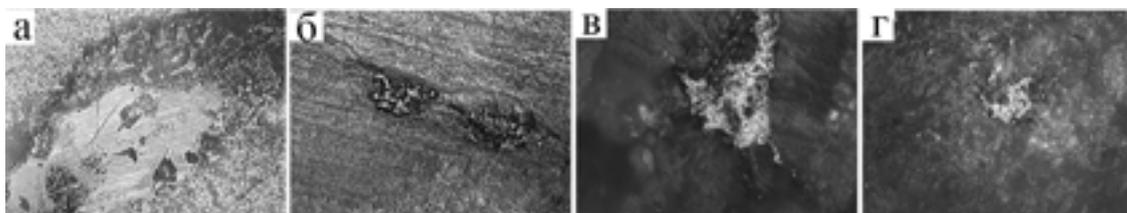


Рис. 5. Выделения самородной платины в дайке лиственитизированного апогарцбургитового серпентинита (канавка 18, восточная оконечность зоны Передового хребта): а – крупное зерно платины (серое, в центре снимка), фон вокруг зерна – нерудный базис, ширина кадра 0,48 мм; б – обособления платины вдоль трещины (в центре снимка), ширина кадра 0,48 мм; в – выделение платины (светлое, в центре снимка), ширина кадра 0,24 мм; г – платина (светлое зерно в центре снимка), тёмный фон – нерудный минерал, ширина кадра 0,24 мм /

Fig. 5. Isolation of native platinum in a dyke of larch-grained apogartsburgite serpentinite (ditch 18, eastern extremity of the zone of the Forward Ridge): a – a large grain of platinum (gray, in the center of the image), the background around the grain is a non-metallic basis, frame width 0.48 mm; b – platinum separations along the crack (in the center of the image), frame width 0.48 mm; c – platinum isolation (light, in the center of the image), frame width 0.24 mm; d – platinum (light grain in the center of the image), dark background – non-metallic mineral, frame width 0.24 mm

В аншлифах установлены самородная платина, пирит, хромит, пикотит, оксиды железа. Самородная платина встречается в виде гнезд светло-серого цвета с металлическим блеском размером до 1,1 мм по длинной оси и 0,1–0,2 мм по короткой (рис. 5а). Форма зерна неправильная, контакты зазубренные, извилистые. Иногда зерна самородной платины приурочены к секущим трещинам по полосчатости лиственита (рис. 5б), где они обладают округлой формой, а также в виде весьма редких мелких ($\leq 0,08$ мм) единичных зерен (рис. 5в, г). Цвет платины в этом случае светло-серый, почти белый, отражательная способность высокая.

Таким образом, с высокой долей вероятности можно предположить, что наличие металлов платиновой группы в углеродисто-терригенных породах артыкчакской свиты, так же, как и в андрюкской свите, связано с ультраосновным петрофондом осадочных пород и дальнейшим эпигенетическим перераспределением рудообразующих элементов.

Выводы

1. Собраны и обобщены фондовые и опубликованные данные о наличии платины и платиноидов в средне-верхнедевонских черносланцевых толщах зоны Передового хребта (Северный Кавказ). Установлены минеральные формы платины и платиноидов в аллювии дренирующих рек. Выявленные в прошлом столетии содержания платины в аллювии реки Власинчихи могут соответствовать по современным условиям россыпному месторождению.

2. Анализ результатов ранее проведенных определений содержаний Pt и Pd в черносланцевых породах андрюкской свиты, достигающих десятых долей г/т, вызывают сомнения в их достоверности, так как в публикациях не указаны места и способы отбора, технология подготовки проб к анализу, не указана также модификация примененного метода атомно-абсорбционной спектроскопии.

3. Полученные нами результаты определения Pt и Pd в черносланцевых породах артыкчакской свиты составляют сотые доли г/т, что расценивается как повышенные (надкларковые) содержания. В единичных случаях сумма содержаний Pt и Pd достигала 0,1 г/т.

4. Проведенные Н.В. Глазыриной прецизионные минераграфические исследования черносланцевых пород андрюкской свиты позволили установить наличие выделений самородной платины непосредственно в породе. Приуроченность таких выделений к перемещенным скоплениям углеродистого вещества и к новообразованиям хромовой слюдки (фукситу) гидротермального генезиса заставляет предположить эпигенетическое происхождение выявленных минеральных форм платины за счет метаморфогенного перераспределения рудообразующих элементов ультраосновного петрофонда.

Литература

1. Богуш И.А., Рябов Г.В. Благородные металлы в россыпях бассейна рек Уруп–Большая Лаба (Северный Кавказ). // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – №3. – С. 94–97.

2. Богуш И.А., Черкашин В.И. Источники благородных металлов (Au, Pt, Pd) на Северном Кавказе. // Литосфера. – 2019. – Т. 19. №3. – С. 465–471. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-3-465-471

3. Богуш И.А., Бурцев А.А., Рябов Г.В. Минералы благородных металлов и их источники на Северном Кавказе. // Наука Юга России. – 2017. – Т. 13. №2. – С. 34–40. DOI: 10.23885/2500-0640-2017-13-2-34-40

4. Богуш И. А., Рябов Г. В., Кафтантаий А.Б. Минералы платиновой группы в аллювии бассейна рек Уруп – Большая Лаба (Северный Кавказ). // Доклады академии наук. – 2010. – Т. 435. №3. – С. 357–360.

5. Богуш И.А., Бурцев А.А., Рябов Г.В., Черкашин В.И. Благородные металлы черносланцевого комплекса Уруп-Лабинского района Северного Кавказа. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2016. – №3(3). – С. 25–32.

6. Богущ 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
7. Богущ И.А., Рябов Г.В., Черкашин В.И., Исаева Н.А. Ультрабазиты и источники благородных металлов (Au, Pt, Pd) на Северном Кавказе. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №4. – С. 15–29. DOI: 10.46698/VNC.2021.71.47.002
8. Глазырина Н.В. Особенности вещественного состава и рудоносность Тоханской черносланцевой формации Северного Кавказа. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2006. – №3. – С.77–80.
9. Глазырина Н.В., Глазырин Е.А. Сульфидная минерализация черносланцевых отложений Тоханского покрова (Большой Кавказ). // Металлогения древних и современных океанов – 2006. Условия рудообразования. – Миасс: УрО РАН, 2006. – С. 134–138.
10. Глазырина Н.В., Глазырин Е.А. Кобальтин-пентландит-пирротиновая аутигенная сульфидная минерализация черносланцевых отложений // Записки Российского минералогического общества. – 2011. – Т. 140. №1. – С. 83–90.
11. Дистлер В.В., Митрофанов Г.Л., Немеров В.К., Коваленкер В.А., Мохов А.В., Семейкина Л.К., Юдовская М.А. Формы нахождения металлов платиновой группы и их генезис в золоторудном месторождении Сухой Лог (Россия). // Геол. руд. месторожд. – 1996. – Т. 38. №6. – С. 467–484.
12. Парада С.Г. Предпосылки и признаки пплатиноносности гипербазитовых массивов Северного Кавказа. // Наука Юга России. – 2017. – Т. 13. №1. – С. 59–73.
13. Парада С.Г., Гамбург К.Ю. Проблемы аналитического определения благородных металлов в черносланцевых породах Юга России. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №3. – С. 119–132. DOI: 10.46698/VNC.2022.23.74.008
14. Ханчук А.И., Бердников Н.В., Черепанов А.А., Коновалова Н.С., Авдеев Д.В. Первые находки видимых платиноидов в черносланцевых толщах Буреинского массива, Хабаровский край и Еврейская АО. // Докл. АН. – 2009. – Т. 424. №5. – С. 672–675.
15. Ханчук А.И., Плюснина Л.П., Руслан А.В., Лихойдов Г.Г., Баринов Н.Н. Природа графитизации и благороднометальной минерализации в метаморфитах северной части Ханкайского террейна, Приморье. // Геол. руд. месторожд. – 2013. – Т. 55. №4. – С. 261–281.
16. Ханчук А.И., Фенгуй С., Молчанов В.П., Гребенникова А.А., Гребенников А.В. Благородные металлы в графитсодержащих породах месторождения Люмао (Китай) // Докл. АН. – 2017. – Т. 473. №1. – С. 80–82.
17. Черкашин В.И., Богущ И.А., Рябов Г.В., Исаева Н.А. Благородные металлы осадочных комплексов фанерозоя Северного Кавказа. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2021. – №3(86). – С. 16–22. DOI:10.33580/2541-9684-2021-86-3-16-22
18. Чернышов Н.М., Коробкина Т.П. Новый тип платинометального оруденения Воронежской провинции: платиноносные углеродистые стратифицированные комплексы. // Платина России. Пробл. развития МСБ платиновых металлов. Третье засед. Научно-методического совета по программе «Платина России». – М.: АОЗТ «Геоинформмарк», 1995. – С. 55–83.
19. Cabri L.J., Oberthür T., Keays R.R. Origin and depositional history of platinum-group minerals in placers—A critical review of facts and fiction. // Ore Geology Reviews. – 2002. – Vol. 144. – p. 104733. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104733
20. Clark A.M., Criddle A.J. Palladium minerals from Hope's Nose, Torquay, Devon. // Mineralogical Magazine. – 1982. – Vol. 46. Iss. 340. – pp. 371–377 DOI: 10.1180/minmag.1982.046.340.13
21. Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mokhov A.V., Trubkin N.V., Razvozhzaeva E.A., Mitrofanov G.L., Nemerov V.K. New Data On Pge Mineralization In Gold Ores Of The Sukhoi Log Deposit, Lensk Gold-Bearing District, Russia. // Doklady Earth Sciences. – 2003. – Vol. 393. No.9. – pp. 1265–1267.

22. Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokof'ev V.Yu., Lishnevskii E.N. Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. // *Ore Geol. Rev.* – 2004. – Vol. 24. – pp. 7–44. DOI:10.1016/j.oregeorev.2003.08.007

23. Fleet M.E., De Almeida C.M., Angeli N. Botryoidal platinum, palladium and potarite from the Bom Sucesso stream, Minas Gerais, Brazil: Compositional zoning and origin. // *Can. Mineral.* – 2022. – Vol. 40. – pp.341–355. DOI: 10.2113/gscanmin.40.2.341

24. Razvozhayeva E.A., Prokof'ev V.Yu., Spiridonov A.M., Martikhaev D.Kh., Prokopchuk S.I. Precious metals and carbonaceous substance in ores of the Sukhoi Log deposit (Eastern Siberia, Russia). // *Geology of Ore Deposits.* – 2002. – Vol. 44. No.2. – pp. 103–110.

References

1. Bogush I.A., Ryabov G.V. Noble metals in placers of the basin of the Urup and Bolshaya Laba rivers (Northern Caucasus). *News of universities. North Caucasian region. Technical science.* 2011. No. 3. pp. 94–97. (In Russ.)

2. Bogush I.A., Cherkashin V.I. Sources of noble metals (AU, PT, PD) in the North Caucasus. *Lithosphere.* 2019. Vol. 19. No. 3. pp. 465–471. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-3-465-471. (In Russ.)

3. Bogush I.A., Burtsev A.A., Ryabov G.V. Minerals of noble metals and their sources in the North Caucasus. *Science of the South of Russia.* 2017. Vol. 13. No. 2. pp. 34–40. DOI: 10.23885/2500-0640-2017-13-2-34-40. (In Russ.)

4. Bogush I.A., Ryabov G.V., Kaftanatii A.B. The platinum group minerals in alluvial deposits of the basin of the Urup and Bols'shaya Laba rivers (North Caucasus) *Doklady Earth Sciences.* 2010. Vol. 435. No. 1. pp. 1427–1430. DOI: 10.1134/S1028334X10110048. (англоязычная версия)

5. Bogush I.A., Burtsev A.A., Ryabov G.V., Cherkashin V.I. Noble metals of the black shale complex of the Urup-Laba region of the North Caucasus. *Grozny Natural Science Bulletin.* 2016. No. 3. Issue 3. pp. 25–32. (In Russ.)

6. Bogush I.A., Ryabov G.V., Cherkashin V.I. Genesis and ore-bearing structures of the Chuchkur deposit of noble metals in 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

7. Bogush I.A., Ryabov G.V., Cherkashin V.I., Isaeva N.A. Ultrabasites and sources of noble metals (Au, Pt, Pd) in the North Caucasus. *Geology and geophysics of the South of Russia.* 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 15–29. DOI: 10.46698/VNC.2021.71.47.002

8. Glazyrina N.V. Features of the material composition and ore content of the Tokhan black shale formation of the North Caucasus. *News of universities. North Caucasian region. Technical science.* 2006. No. 3. pp.77–80. (In Russ.)

9. Glazyrina N.V., Glazyrin E.A. Sulfide mineralization of black shale deposits of the Tokhan cover (Greater Caucasus). *Metallogeny of ancient and modern oceans 2006. Conditions of ore formation.* Miass: Ural Branch of RAS. 2006. pp. 134–138. (In Russ.)

10. Glazyrina N.V., Glazyrin E.A. Cobaltite-pentlandite-pyrrhotite authigenic sulfide mineralization of black shale deposits. *Notes of the Russian Mineralogical Society.* 2011. Vol. 140. No. 1. pp. 83–90. (In Russ.)

11. Distler V.V., Mitrofanov G.L., Nemerov V.K., Kovalenker V.A., Mokhov A.V., Semeikina L.K., Yudovskaya M.A. Forms of occurrence of platinum group metals and their genesis in the Sukhoi Log gold deposit (Russia). *Geology of ore fields.* 1996. Vol. 38. No. 6. pp. 467–484. (In Russ.)

12. Parada S.G. Prerequisites and signs of platinum content of hypermafic massifs of the North Caucasus. *Science of the South of Russia.* 2017. Vol. 13. No. 1. pp. 59–73. (In Russ.)

13. Parada S.G., Hamburg K.Yu. Problems of analytical determination of noble metals in black shale rocks of the South of Russia. *Geology and geophysics of the South of Russia.* 2022. Vol. 12. No. 3. pp. 119–132. DOI: 10.46698/VNC. 2022.23.74.008 (In Russ.)

14. Khanchuk A.I., Berdnikov N.V., Cherepanov A.A., Konovalova N.S., Avdeev D.V. First finds of platinoids in black-shale sequences of the Bureya massif (Khabarovsk Region and Jewish Autonomous Okrug). *Doklady Earth Sciences*. 2009. Vol. 425. No. 1. pp. 213–215. (англоязычная версия)

15. Khanchuk A.I., Plyusnina L.P., Ruslan A.V., Likhoidov G.G., Barinov N.N. Nature of graphitization and noble metal mineralization in metamorphic rocks of the northern part of the Khanka terrane, Primorye. *Geology of ore fields*. 2013. Vol. 55. No. 4. pp. 261–281. (In Russ.)

16. Khanchuk A.I., Molchanov V.P., Grebennikova A.A., Grebennikov A.V., Sun F. Noble metals in graphite-bearing rocks of the Liunao deposit (China). *Doklady Earth Sciences*. 2017. Vol. 473. No. 1. pp. 300–302. DOI: 10.1134/S1028334X17030047. (англоязычная версия)

17. Cherkashin V.I., Bogush I.A., Ryabov G.V., Isaeva N.A. Noble metals of sedimentary complexes of the Phanerozoic of the North Caucasus. In: *Proceedings of the Institute of Geology of DSC RAS*. 2021. No. 3. Issue 86. pp. 16–22. DOI:10.33580/2541-9684-2021-86-3-16-22. (In Russ.)

18. Chernyshov N.M., Korobkina T.P. A new type of platinum-metal mineralization in the Voronezh province: platinum-bearing carbonaceous stratified complexes. *Platinum of Russia. Problems of development of MRB of platinum metals*. Moscow. AOZT Geoinformmark. 1995. pp. 55–83. (In Russ.)

19. Cabri L.J., Oberthür T., Keays R.R. Origin and depositional history of platinum-group minerals in placers—A critical review of facts and fiction. *Ore Geology Reviews*. 2002. Vol. 144. p. 104733. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104733

20. Clark A.M., Criddle A.J. Palladium minerals from Hope's Nose, Torquay, Devon. *Mineralogical Magazine*. 1982. Vol. 46. Iss. 340. pp. 371–377 DOI: 10.1180/minmag.1982.046.340.13

21. Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mokhov A.V., Trubkin N.V., Razvozzhaeva E.A., Mitrofanov G.L., Nemerov V.K. New Data On Pge Mineralization In Gold Ores Of The Sukhoi Log Deposit, Lensk Gold-Bearing District, Russia. *Doklady Earth Sciences*. 2003. Vol. 393. No.9. pp. 1265–1267.

22. Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokof'ev V.Yu., Lishnevskii E.N. Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geol. Rev*. 2004. Vol. 24. pp. 7–44. DOI:10.1016/j.oregeorev.2003.08.007

23. Fleet M.E., De Almeida C.M., Angeli N. Botryoidal platinum, palladium and potarite from the Bom Sucesso stream, Minas Gerais, Brazil: Compositional zoning and origin. *Can. Mineral*. 2022. Vol. 40. pp.341–355. DOI: 10.2113/gscanmin.40.2.341

24. Razvozzhaeva E.A., Prokof'ev V.Yu., Spiridonov A.M., Martikhaev D.Kh., Prokopchuk S.I. Precious metals and carbonaceous substance in ores of the Sukhoi Log deposit (Eastern Siberia, Russia). *Geology of Ore Deposits*. 2002. Vol. 44. No.2. pp. 103–110.

УДК 553.048(073)

DOI: [10.46698/VNC.2023.90.90.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.90.90.009)

Оригинальная статья

Объемная цифровая модель глубоких горизонтов Главной рудной залежи Урупского медно-колчеданного месторождения

Г.С. Январёв , Б.Б. Бобмуротов 

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

Статья поступила: 07.02.2023, доработана: 05.03.2023, одобрена в печать: 10.03.2023

Резюме: Актуальность работы. Объемное цифровое моделирование тел полезных ископаемых в процессе добычи и эксплуатационной разведки все более активно внедряется в практику работ горнодобывающих предприятий для оперативного планирования и учета движения запасов. В то же время проходка разведочных скважин в разных плоскостях разрабатываемого объема геологического пространства создает сложности в увязке границ рудных тел в межпрофильном пространстве и планировании добычных работ, а использование горно-геологических информационных систем требует от исполнителя отработки определенных алгоритмов последовательного использования инструментов для получения адекватных моделей с учетом уникальных особенностей каждого месторождения, объема и содержания исходных данных. В настоящей работе впервые для глубоких горизонтов Урупского медноколчеданного месторождения построена объемная цифровая модель рудной залежи, иллюстрирующая пространственное распределение содержаний и запасов рудных компонентов. Опыт такой работы может быть полезен специалистам, занимающимся эксплуатационной разведкой. **Цель работы.** Комплексирование инструментария горно-геологической информационной системы «Micromine» для построения объемной модели рудной залежи. Анализ распределения содержаний полезных компонентов и запасов в объеме рудной залежи. Поиск перспективных направлений дальнейшего развития добычных работ. **Методика исследования.** В работе описан пошаговый алгоритм построения цифровой блочной модели Главной рудной залежи Урупского месторождения с использованием штатных инструментов горно-геологической информационной системы «Micromine», таких как условное моделирование (объект «жила»), построение каркасов по линиям геологических границ проецированных на плоскости разрезов, заполнение каркасов блоками с интерполяцией содержаний из проб скважин в центр блока методом обратных взвешенных расстояний. **Результаты исследования.** Построены каркасная и блочная модели глубоких горизонтов Главной рудной залежи месторождения. Подобраны оптимальные размер и ориентация осей эллипсоида поиска для интерполяции содержаний рядовых проб в ячейки блочной модели. Показано распределение содержаний меди, коэффициента зональности $Zn/(Zn+Cu)$ и запасов в плоских сечениях. Выявлена тенденция приуроченности максимумов запасов в плоскости рудной залежи к зонам, ориентированным с северо-запада на юго-восток, расположенным между ветвями главных тектонических нарушений. В разрезе залежи максимумы запасов образуют «кулисы», ориентированные к литологической границе кровли залежи под углом 5° .

Ключевые слова: Урупское месторождение, ГГИС «Micromine», блочная модель, медь, запасы, зональность.

Для цитирования: Январёв Г.С., Бобмуротов Б.Б. Объемная цифровая модель глубоких горизонтов Главной рудной залежи Урупского медно-колчеданного месторождения. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(1): 125-135. DOI: 10.46698/VNC.2023.90.90.009.

DOI: [10.46698/VNC.2023.90.90.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.90.90.009)

Original paper

Volumetric digital model of deep horizons of the Main ore deposit of the Urupsky copper-crusted deposit

G.S. Yanvarev , B.B. Bobomurotov Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132 Prosveshcheniya Str.,
Novocherkassk 346428, Russian Federation, e-mail: egor_yan@list.ru

Received: 07.02.2023, revised: 05.03.2023, accepted: 10.03.2023

Abstract: Relevance. Volumetric digital modeling of mineral bodies in the process of mining and operational exploration is increasingly being introduced into the practice of mining enterprises for operational planning and accounting of the movement of reserves. At the same time, the penetration of exploration wells in different planes of the developed volume of geological space creates difficulties in linking the boundaries of ore bodies in the interprofile space and planning mining operations, and the use of mining and geological information systems requires the contractor to work out certain algorithms for the consistent use of tools to obtain adequate models, taking into account the unique features of each deposit and the volume and content of the initial data. In this paper, for the first time, a volumetric digital model of an ore deposit illustrating the spatial distribution of the contents and reserves of ore components is constructed for the deep horizons of the Urup copper-crusted deposit. The experience of such work can be useful to specialists engaged in operational exploration. **Aim.** Integration of the tools of the mining and geological information system “Micromine” for the construction of a volumetric model of an ore deposit. Analysis of the distribution of the contents of useful components and reserves in the volume of the ore deposit. Search for promising areas for further development of mining operations. **Methods.** The paper describes a step-by-step algorithm for constructing a digital block model of the Main ore deposit of the Urupskoye deposit using standard tools of the mining and geological information system “Mycromine”, such as conditional modeling (the “vein” object), building frames along the lines of geological boundaries projected on the plane of sections, filling frames with blocks with interpolation of contents from well samples to the center block by the method of inverse weighted distances. **Results.** Frame and block models of deep horizons of the Main ore deposit of the deposit were constructed. The optimal size and orientation of the search ellipsoid axes for interpolating the contents of ordinary samples into the cells of the block model are selected. The distribution of copper contents, zoning coefficient $Zn/(Zn+Cu)$ and reserves in flat sections is shown. The tendency of the reserve maxima in the plane of the ore deposit to be confined to zones oriented from northwest to southeast, located between the branches of the main tectonic disturbances, has been revealed. In the section of the deposit, the maximum reserves form “wings” oriented to the lithological boundary of the roof of the deposit at an angle of 5°.

Keywords: Urupskoe field, MGIS «Micromine», block model, copper, reserves, zonation.

For citation: Yanvarev G.S., Bobomurotov B.B. Volumetric digital model of deep horizons of the Main ore deposit of the Urupsky copper-crusted deposit. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(1): 125-135. DOI: 10.46698/VNC.2023.90.90.009.

Введение

Урупское медноколчеданное месторождение расположено в Лабино-Урупском горнопромышленном центре и является основным эксплуатируемым объектом меди Северного Кавказа [Богущ и др., 2021].

Большинство аналитических работ, опубликованных по месторождению, базируется на информации, полученной при разведке и эксплуатации верхних горизонтов (от 1 до 10) [Скрипченко, 1966; 1972; Савченко, 1973; Hutchinson, 1973; Твалчрелидзе и др., 1979; Смирнов, 1978]. В настоящее время накоплен большой объем информации, полученной при эксплуатации глубоких горизонтов (12–16), который требует обработки с использованием современного инструментария цифрового объемного моделирования и дополнительного анализа.

В настоящей работе впервые для глубоких горизонтов Урупского медноколчеданного месторождения построена объемная цифровая модель Главной рудной залежи, иллюстрирующая пространственное распределение содержаний и запасов рудных компонентов, раскрыта последовательность выполнения операций по построению блочной модели, приведены результаты построений, на основе которых возможно получение новой информации.

Методы работы

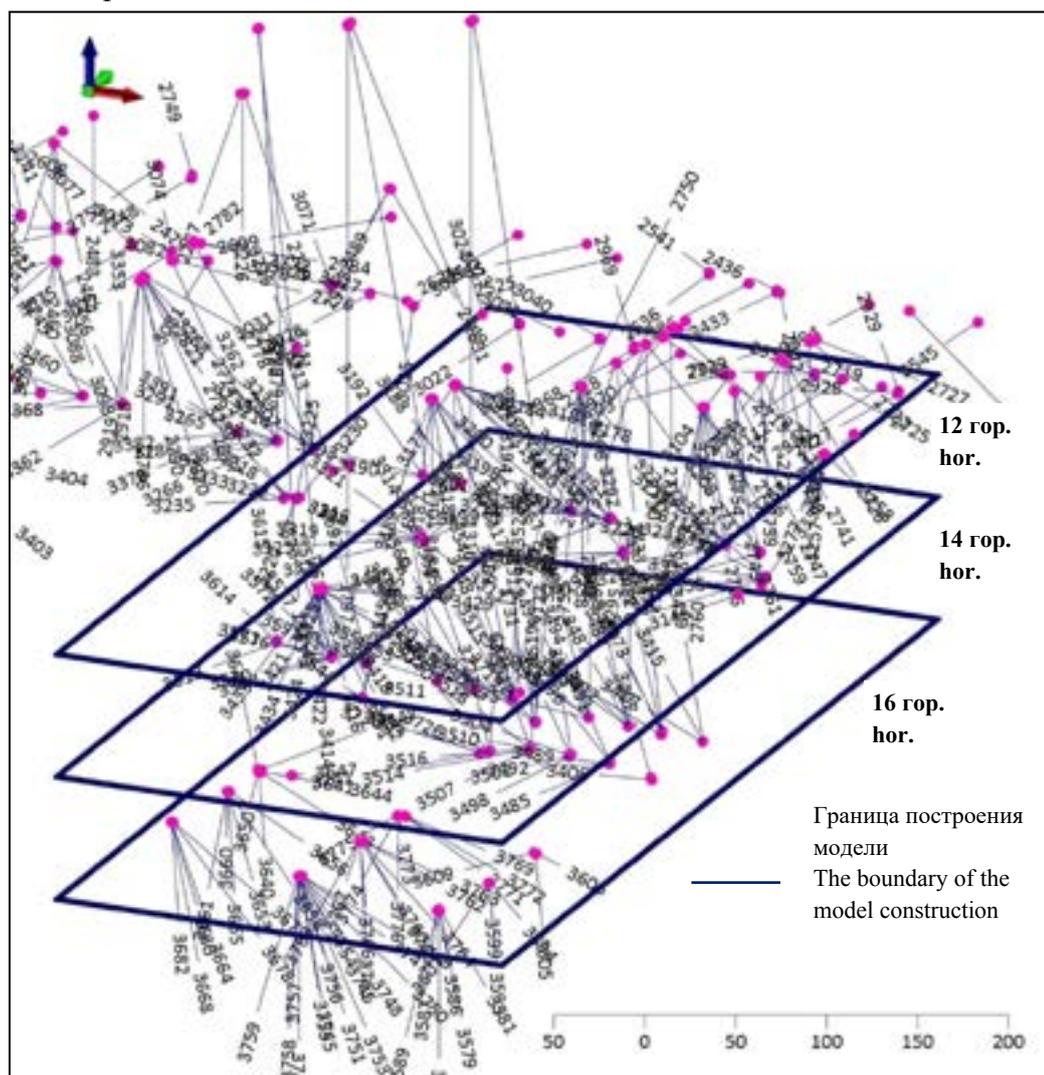
Цифровое моделирование месторождений полезных ископаемых все более активно используется горнодобывающими предприятиями как для оперативного планирования и учета движения запасов, так и для ведения опережающей эксплуатационной разведки [Sides, 1997; Porwal, Carranza, 2015; Zuo et al., 2016; Sun et al., 2019; Mao et al., 2020; Liu, 2022] и других проблем [Zaalishvili et al., 2014a, b; 2016]. В то же время проходка разведочных скважин в разных плоскостях разрабатываемого объема геологического пространства создает сложности в увязке границ рудных тел в межпрофильном пространстве, а использование горно-геологических информационных систем (ГГИС) требует от исполнителя отработки определенных алгоритмов последовательного использования инструментов для получения адекватных моделей с учетом уникальных особенностей каждого месторождения и объема и содержания исходных данных.

Главная залежь Урупского месторождения обобщенно представляет собой линзу массивных колчеданных руд, субсогласных прожилков и рассеянной вкрапленности сульфидов на контакте эффузивных и туфогенно-осадочных пород, падающую на юг под углом 22–25°. В плане это примерно изометричное тело с отношением длины по простиранию к длине по падению 7:6. Исходными данными для построения объемной модели глубоких горизонтов явились 477 скважин эксплуатационной разведки с результатами опробования (3950 проб) и геологической документации. Используются скважины в границах между 0 и 35 разрезами (западный фланг месторождения) на 12–16 горизонтах (рис. 1).

Скважины расположены веерами в диапазоне 360° во всех плоскостях. В таких условиях провести адекватную увязку геологических границ в плоскостях разрезов или горизонтов достаточно сложно. Разрезы и планы геологоразведки представляют собой приблизительный вариант реальной картины.

Для построения объемной модели рудного тела в первую очередь необходимо было установить конфигурацию границ рудной залежи по скважинам эксплуатационной разведки. Кровля руды на месторождении, как правило, резкая, имеет литологический контроль. Подошва рудного тела представлена как сплошными, так и вкрапленными колчеданными рудами. В соответствии с действующими параметрами кондиций для построения модели рудной залежи граница кровли принята по содержанию меди 0,6%. За подошву залежи принята граница опробования с содер-

жанием серы 18%.



*Рис. 1. Исходные данные для построения объемной модели. 3D изображение /
Fig. 1. Initial data for building a volumetric model. 3D image*

На предприятии плоскости разведочных пересечений (линии разрезов) проведены через 12 м. Соответственно на разрезах выделены интервалы руды по скважинам (штриховки) с окном просмотра «от себя-на себя» 6 м.

Для определения границ подошвы и кровли рудного тела в межскважинном пространстве на первом шаге был построен каркас тела с использованием инструмента условного моделирования «жила» [Федотов, Январёв, 2021], которое является альтернативой традиционному методу. При построении поверхностей кровли и подошвы тела в режиме условного моделирования использован метод радиальных базисных функций. Функции обеспечивают жесткую интерполяцию, но в то же время прогнозируют положение поверхности выше или ниже зафиксированных значений, обеспечивая её минимальную кривизну.

На втором шаге, ориентируясь на тренд изменения границы, установленный в результате применения инструментов условного моделирования, построен каркас рудного тела методом линейной интерполяции по контактам подошвы и кровли, зафиксированным скважинами и спроецированным на плоскость разреза. Необхо-

димось проецирования контактов рудного тела на плоскость разреза обусловлена тем, что при построении каркаса без проекции точек подошвы и кровли руды на плоскость разреза возникают многочисленные пересекающиеся треугольники, избавиться от которых практически невозможно.

Эффективность такого подхода подтверждается практически полным совпадением границ каркаса, построенного по скважинам разведки с границами, установленными по документации горных выработок очистных работ (рис. 2).

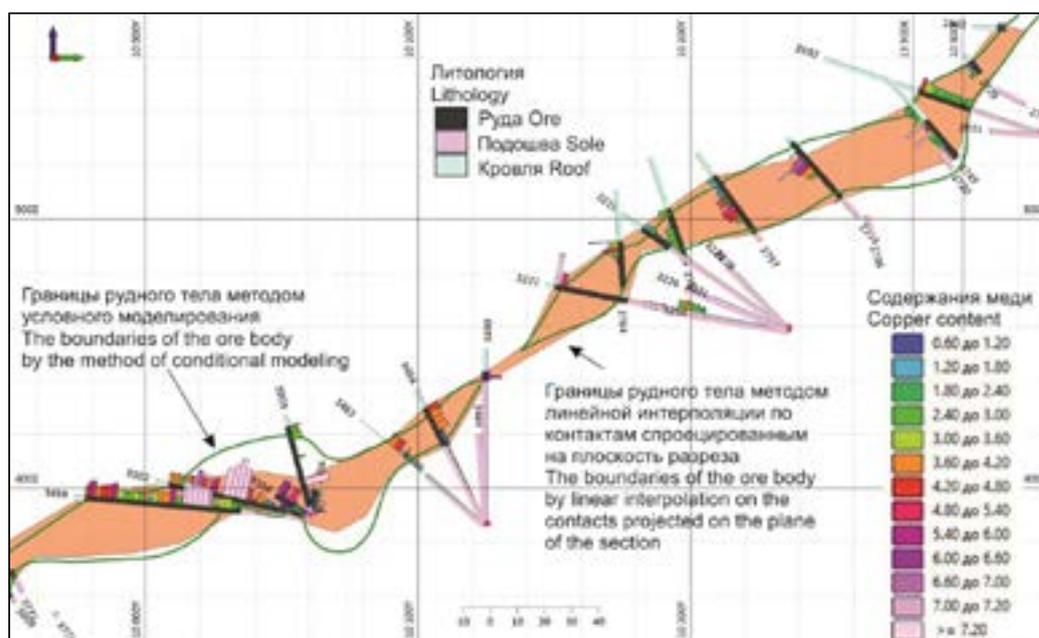


Рис. 2. Каркас Главной рудной залежи Урупского м-ния по 9 профилю (ниже 11 горизонта) /
Fig. 2. The frame of the Main ore deposit of the Urup mine along the 9th profile (below the 11th horizon)

На заключительном шаге построена блочная модель рудной залежи по итоговому каркасу. Размер блоков 5x5x2 м. Блоки ориентированы длинной стороной вдоль рудной залежи и короткой – по мощности.

Интерполяция содержаний Cu, Zn и S, установленных в пробах скважин эксплуатационной разведки, в блоки осуществлялась методом анизотропных обратных расстояний. Ориентировка эллипсоида скользящего окна выбрана в соответствии с установленной ранее ориентировкой зональности в эксплуатационных блоках [Бобмуротов, 2022], контролируемой палеоструктурой северо-западного простирания [Рябов, 1983]. В соответствии с работой алгоритма для расчета средневзвешенных значений содержаний по блоку использовалось по три пробы из не менее чем трех скважин, расположенных наиболее близко к центру блока. Таким образом, каждый блок отражает средневзвешенное содержание компонента в элементарном объеме рудной залежи и, в то же время, не слишком усредняет содержания с потерей дискретности (рис. 3).

Результаты работы и их обсуждение

Рудная залежь разбита на многочисленные тектонические блоки разных размеров разрывными нарушениями сбросового и надвигового типа, которые в большинстве случаев рассматриваются как оперяющиеся трещины основных пострудных

разломов [Савченко и др., 1973]. Очевидно, что резкие смещения кровли каркаса и сокращения мощности обусловлены Урупским и Западным разломами. Часть разрывов трактуется как результат растяжения сульфидного тела в процессе гравитационного уплотнения вулканогенно-осадочной среды и накопления деформирующих напряжений в условиях площадного давления на рудный пласт [Скрипченко и др., 2007; Яицкая, Бригида, 2022; Заалишвили и др., 2021]. В подавляющем большинстве случаев амплитуда смещения по таким разрывам не превышает мощности рудной залежи, поэтому при построении каркаса они не учитывались.

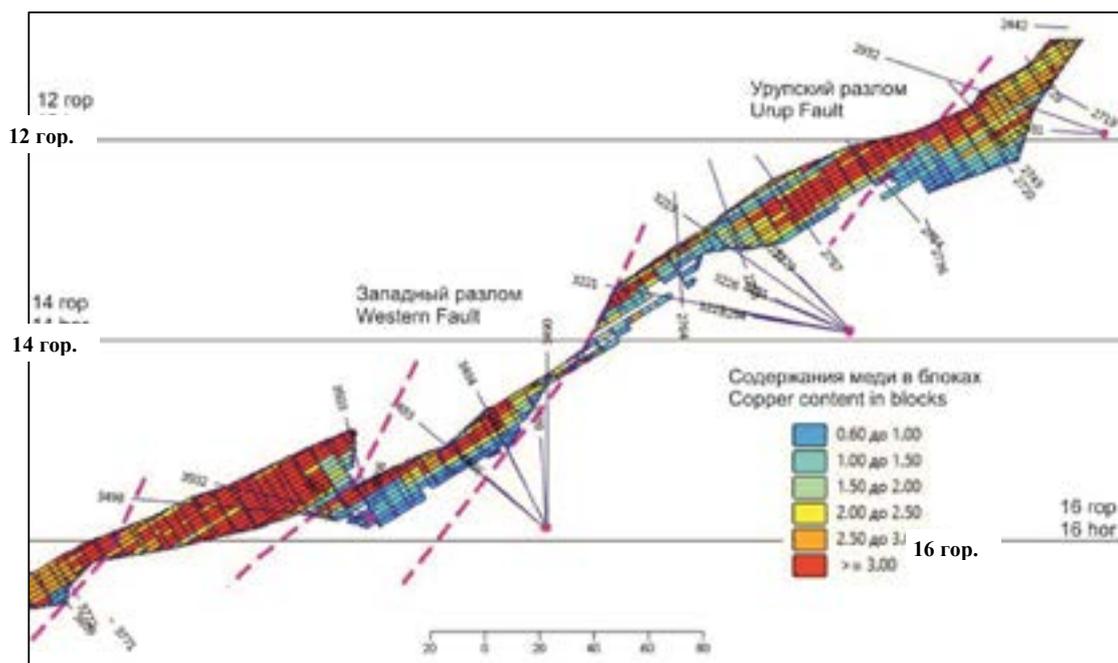


Рис. 3. Блочная модель распределения содержаний Cu (%) в Главной рудной залежи Урупского м-ния по 9 профилю (ниже 11 горизонта) /

Fig. 3. Block model of distribution of Cu contents (%) in the Main ore deposit of the Urupskoye mine along profile 9 (below horizon 11)

Зональность колчеданных месторождений, – одна из их важнейших характеристик, позволяющая судить о генезисе и эффективно проводить разведку и планировать движение запасов. Анализ большого количества колчеданных месторождений различного состава и строения позволил установить общие черты их зональности [Логинов, 1974 и др.] и наметить типовой ряд зональности рудных элементов, имеющий вид: Fe (Co) → Fe, Cu (Au) → Zn, Pb (Au, Ag) [Рундквист, Неженский, 1975].

В целом для верхних горизонтов Главной залежи месторождения установлены поперечная и латеральная зональности [Резников, 1981; Рябов, 1983; Skripchenko, 1986]. В поперечном разрезе залежи закономерно возрастает содержание меди в направлении от подошвы к кровле с резким падением концентрации на верхнем контакте, что связано с диагенетическим окислительным воздействием водной среды, перекрывающей рудную залежь на момент ее образования. Блочная модель глубоких горизонтов в целом подтверждает эту закономерность (см. рис. 3). Но в отличие от типового ряда зональности, коэффициент зональности $Zn/(Cu+Zn)$, рассчитанный по блочной модели, показывает на относительное обогащение цинком подошвы залежи (рис. 4).

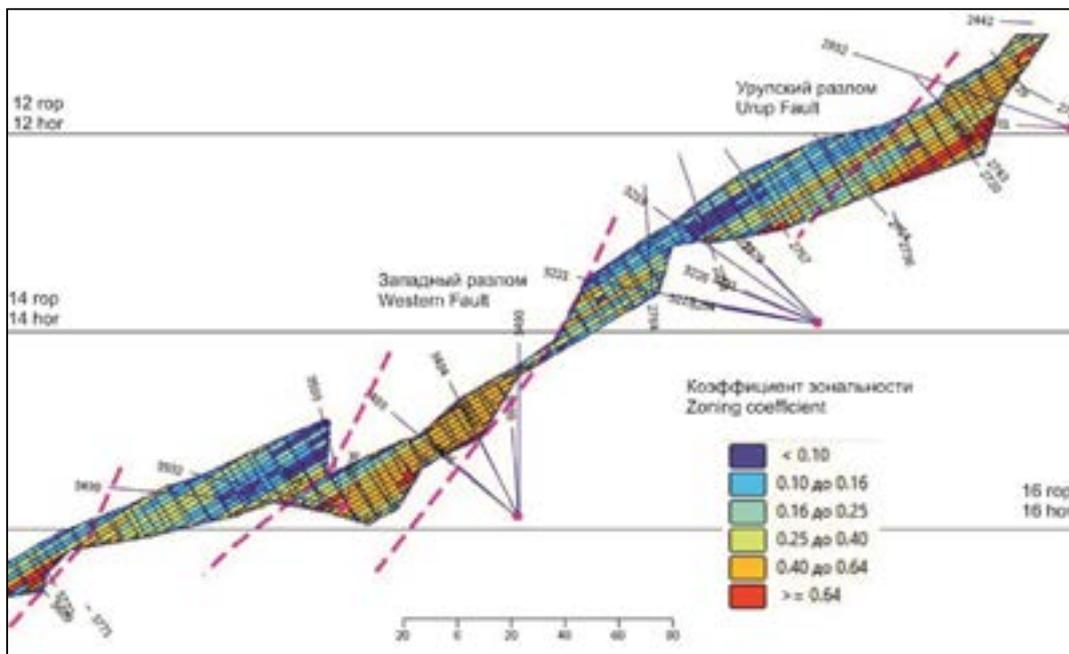


Рис. 4. Блочная модель распределения $Zn/(Cu+Zn)$ в Главной рудной залежи Урупского м-ния по 9 профилю (ниже 11 горизонта) /

Fig. 4. Block model of $Zn/(Cu+Zn)$ distribution in the Main ore deposit of the Urupskoye mine along profile 9 (below horizon 11)

В то же время следует отметить, что блочная модель может отражать не только содержание меди, но и ее запасы с учетом объемной массы по классам содержаний серы (рис. 5).

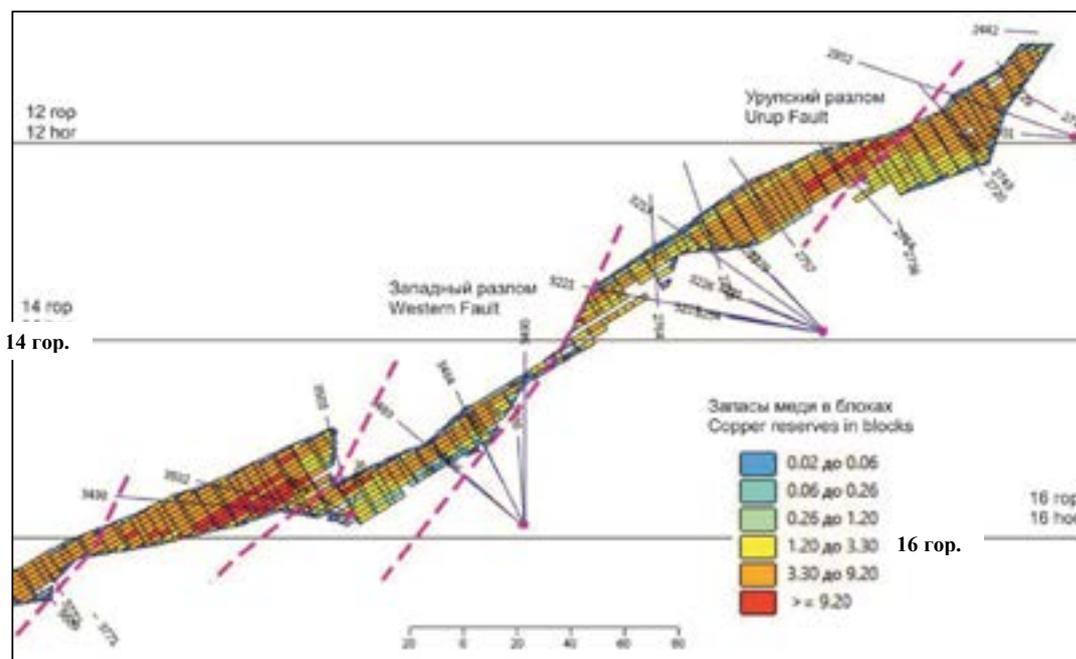


Рис. 5. Блочная модель распределения запасов Cu в тоннах в Главной рудной залежи Урупского м-ния по 9 профилю (ниже 11 горизонта) /

Fig. 5. Block model of distribution of Cu reserves in tons in the Main ore deposit of the Urupskoye mine along profile 9 (below horizon 11)

В этом аспекте для планирования горных работ блочная модель распределения запасов представляет гораздо больший интерес, чем графики распределения содержаний, показанные на рисунке 2.

Создание блочной объемной модели рудной залежи позволяет проследить поведение интерполируемых показателей в любых плоскостях. Как в плоскостях разрезов и погоризонтных планов, принятых на предприятии, так и в плоскостях, ориентированных вкрест простирания Урупского разлома (с юго-запада на северо-восток).

Построение системы таких разрезов позволило выявить следующие закономерности:

1. Содержание меди в пределах Главной залежи в целом закономерно возрастает в направлении от подошвы к кровле, но максимумы содержаний образуют «чешуи», косо ориентированные к литологической границе рудного тела под углом около 5°. Аналогичным образом ведут себя запасы меди, причем максимумы запасов смещены вниз относительно кровли на 2–5 метров.

2. Распределение цинка по мощности залежи более равномерно и беспорядочно, но отношение содержаний цинка к сумме содержаний металлов показывает более высокие значения этого коэффициента в подошве залежи.

3. В плане максимумы и минимумы запасов образуют полосы, ориентируемые в соответствии с генеральным простиранием основных разломов (с северо-запада на юго-восток), причем максимумы запасов располагаются между ветвями главных тектонических нарушений. Исходя из этого, большее количество запасов следует ожидать на восточном продолжении залежи между 16 и 17 горизонтами в интервале разрезов 0–10.

Выводы

Использование штатных инструментов ГГИС «Micromine» в рекомендуемой последовательности (построение предварительного каркаса рудного тела способом условного моделирования «жила», корректировка каркаса способом линейной интерполяции по контактам, спроецированным на плоскость разреза, построение блочной модели по итоговому каркасу) позволяет получить картину распределения рудных компонентов и их соотношений в разноориентированных сечениях рудного тела.

Установлен характер распределения Cu, Zn и запасов по элементарным блокам в объеме рудной залежи, что может быть использовано для оперативного планирования добычных работ.

Дальнейшее развитие добычных работ за границами исследуемой области рекомендуется сосредоточить на 16-17 горизонтах в интервале между 0 и 10 разрезами.

Литература

1. Богуш И.А., Рябов Г.В., Бурцев А.А. Колчеданы Северного Кавказа. Перспективы рудоносности Худесского месторождения. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №3. – С. 6–16. DOI:10.46698/VNC.2021.80.87.001
2. Бобомуротов Б.Б. Пространственное распределение меди и цинка в Главной рудной залежи Урупского медноколчеданного месторождения, Северный Кавказ. // Металлогения древних и современных океанов-2022. От вещественного состава к моделям и прогнозированию месторождений. Научное издание. – Миасс: ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 2022. – 248 с.
3. 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

4. Логинов В. П. Эндогенная зональность колчеданных месторождений. // Зональность гидротермальных рудных месторождений. Т. II. – М.: Наука, 1974. – С. 7–85.
5. Резников Н.В. Зональность Урупских медноколчеданных месторождений. // Гелог. рудн. месторожд. – 1981. – №3. – С. 30–40.
6. Рундквист Д.В., Неженский Н.А. Зональность эндогенных рудных месторождений. – Л.: Недра, 1975. – 224 с.
7. Рябов Г.В. Зональность Урупского колчеданного месторождения. // Геология рудных месторождений. – 1983. – №5. – С. 102–108.
8. Савченко Н.А., Скрипченко Н.С., Тамбиев А.С. Урупский рудный район. / В кн. Колчеданные месторождения Большого Кавказа. – М.: Недра, 1973. – С. 75–100.
9. Скрипченко Н.С., Андреева О.В., Прядка Р.Д. Сколовое косослоистое будинирование пластовых колчеданных залежей урупского типа: научное издание. // Геодинамические и генетические модели рудных месторождений. – Ростов н/Д: Юж. науч. центр РАН, 2007. – С. 223–230.
10. Скрипченко Н.С. Вулканогенно-осадочное рудообразование (на примере колчеданных месторождений Северного Кавказа). – М.: Недра, 1966. – 291 с.
11. Скрипченко Н.С. Гидротермально-осадочные сульфидные руды базальтоидных формаций. – М.: Недра, 1972. – 214 с.
12. Смирнов В.И. Рудные месторождения СССР. В 3-х т. Изд. 2-е, перераб. и доп. Т. 2. – М.: Недра, 1978. – 399 с.
13. Твалчрелидзе А.Г., Ярошевич В.З., Нарозаули Н.Г. Генетическая модель Урупского медноколчеданного месторождения. // Геол. рудн. месторожд. – 1979. – №6.
14. Федотов Г.С., Январев Г.С. Объемное цифровое моделирование геологических тел в процессе разведки: учебное пособие. – М.: Издательство «Горная книга», 2021. – 168 с.
15. Яицкая Н.А., Бригида В.С. Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №1. – С. 162–173. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012.
16. Sides E. Geological modelling of mineral deposits for prediction in mining. // Geol Rundsch. – 1997. – Vol. 86. – pp. 342–353. DOI: 10.1007/s005310050145
17. Sun Tao, Chen Fei, Zhong Lianxiang, Liu Weiming, Wang Yun GIS-based mineral prospectivity mapping using machine learning methods: A case study from Tongling ore district, eastern China. // Ore Geology Reviews. – 2019. – Vol. 109. – pp. 26-49. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.04.003.
18. Hutchinson R.W. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance. // Economic Geology. – 1973. – Vol. 68. – pp. 1223–1246.
19. Liu Y., Carranza E.J.M., Xia, Q. Developments in Quantitative Assessment and Modeling of Mineral Resource Potential: An Overview. // Nat Resour Res. – 2022. – Vol. 31. – pp. 1825–1840. DOI: 10.1007/s11053-022-10075-2
20. Mao X., Zhang W., Liu Z., Ren J., Bayless R. C., Deng, H. 3D mineral prospectivity modeling for the low-sulfidation epithermal gold deposit: A case study of the Axi gold deposit, western Tianshan, NW China. // Minerals. – 2020. – Vol. 10(3). – pp. 1–21.
21. Porwal A., Carranza E.J.M. Introduction to the Special Issue: GIS-based mineral potential modelling and geological data analyses for mineral exploration. // Ore Geology Reviews. – 2015. – Vol. 71. – pp. 477–483.
22. Skripchenko N.S., Shcheglov V.I., Ryabov G.V., Andreev V.L. Zonung of massive sulfide deposits and their origin: Geology and metallogeny of copper deposits. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 1986. – pp. 350-357.
23. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Mel'kov D.A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of northern Caucasus. // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2014a. – Vol. 50(2). – pp. 263–272.

24. Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014b. – Vol. 50(5). – pp. 707–718.

25. Zaalishvili V., Mel'kov D., Kanukov A., Dzeranov B. Spectral-temporal features of seismic loadings on the basis of strong motion wavelet database. // *International Journal of GEOMATE*. – 2016. – Vol. 10(1). – pp. 1656–1661.

26. Zuo R., Carranza E.J.M., Wang J. Spatial analysis and visualization of exploration geochemical data. // *Earth Science Reviews*. – 2016. – Vol. 158. – pp. 9–18.

References

1. Bogush I.A., Ryabov G.V., Burtsev A.A. Pyritic deposits of North Caucasus. Prospects of minerality of Hudes deposit. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No.3. pp. 6–16. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.80.87.001.

2. Bobomurotov B.B. Spatial distribution of copper and zinc in the Main ore deposit of the Urup-sky copper pyrite deposit, North Caucasus. *Metallogeny of ancient and modern oceans-2022. From material composition to models and forecasting of deposits*. Scientific publication. Miass, YuU FNTs MiG Ural Branch of the RAS, 2022. 248 p. (in Russ.)

3. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Gabaraev A.F., Merzlikin T.I. Nonlinear vibrations of soil strata according to instrumental and numerical data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No.4. pp. 70–82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006 (in Russ.)

4. Loginov V.P. Endogenous zoning of pyrite deposits. *Zoning of hydrothermal ore deposits*. Vol. II. Moscow. Nauka, 1974. pp. 7–85. (in Russ.)

5. Reznikov N.V. Zoning of the Urup copper sulfide deposits. *Geology of ore deposits*. 1981. No.3. pp. 30–40. (in Russ.)

6. Rundkvist D.V., Nezhensky N.A. Zoning of endogenous ore deposits. Leningrad. Nedra, 1975. 224 p. (in Russ.)

7. Ryabov G.V. Zoning of the Urup pyrite deposit. *Geology of ore deposits*. 1983. No.5. pp. 102–108. (in Russ.)

8. Savchenko N.A., Skripchenko N.S., Tambiev A.S. Urup ore district. In the book. *Pyrite deposits of the Greater Caucasus*. Moscow. Nedra, 1973. pp. 75–100. (in Russ.)

9. Skripchenko N.S., Andreeva O.V., Pryadka R.D. Cleavage cross-layered boudinage of layered pyrite deposits of the Urup type: scientific publication. *Geodynamic and genetic models of ore deposits*. Rostov on Don. SSC RAS. 2007. pp. 223–230. (in Russ.)

10. Skripchenko N.S. Volcanogenic-sedimentary ore formation (on the example of pyrite deposits of the Northern Caucasus). Moscow. Nedra. 1966. 291 p. (in Russ.)

11. Skripchenko N.S. Hydrothermal-sedimentary sulfide ores of basaltoid formations. Moscow. Nedra. 1972. 214 p. (in Russ.)

12. Smirnov V.I. Ore deposits of the USSR. In 3 volumes. Ed. 2nd, updated and revised. Vol. 2. Moscow. Nedra. 1978. 399 p. (in Russ.)

13. Tvalchrelidze A.G., Yaroshevich V.Z., Narozauli N.G. Genetic model of the Urup copper pyrite deposit. *Geology of ore deposits*. 1979. No.6. (in Russ.)

14. Fedotov G.S., Yanvarev G.S. Volumetric digital modeling of geological bodies in the process of exploration: a tutorial. Moscow. Gornaykniga. 2021. 168 p. (in Russ.)

15. Yaitskaya N.A., Brigida V.S. Geoinformation technologies in solving three-dimensional geocological problems. Spatial data interpolation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No.1. pp. 162–173. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012. (in Russ.)

16. Sides E. Geological modelling of mineral deposits for prediction in mining. *Geol Rundsch*. 1997. Vol. 86. pp. 342–353. DOI: 10.1007/s005310050145

17. Sun Tao, Chen Fei, Zhong Lianxiang, Liu Weiming, Wang Yun GIS-based mineral prospectivity mapping using machine learning methods: A case study from Tongling ore district, eastern China. *Ore Geology Reviews*. 2019. Vol. 109. pp. 26–49. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.04.003.

18. Hutchinson R.W. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance. *Economic Geology*. 1973. Vol. 68. pp. 1223–1246.
19. Liu Y., Carranza E.J.M., Xia, Q. Developments in Quantitative Assessment and Modeling of Mineral Resource Potential: An Overview. *Nat Resour Res*. 2022. Vol. 31. pp. 1825–1840. DOI: 10.1007/s11053-022-10075-2
20. Mao X., Zhang W., Liu Z., Ren J., Bayless R. C., Deng, H. 3D mineral prospectivity modeling for the low-sulfidation epithermal gold deposit: A case study of the Axi gold deposit, western Tianshan, NW China. *Minerals*. 2020. Vol. 10(3). pp. 1–21.
21. Porwal A., Carranza E.J.M. Introduction to the Special Issue: GIS-based mineral potential modelling and geological data analyses for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*. 2015. Vol. 71. pp. 477–483.
22. Skripchenko N.S., Shcheglov V.I., Ryabov G.V., Andreev V.L. Zonung of massive sulfide deposits and their origin: Geology and metallogeny of copper deposits. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1986. pp. 350–357.
23. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Mel'kov D.A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of northern Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014a. Vol. 50(2). pp. 263–272.
24. Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014b. Vol. 50(5). pp. 707–718.
25. Zaalishvili V., Mel'kov D., Kanukov A., Dzeranov B. Spectral-temporal features of seismic loadings on the basis of strong motion wavelet database. *International Journal of GEOMATE*. 2016. Vol. 10(1). pp. 1656–1661.
26. Zuo R., Carranza E.J.M., Wang J. Spatial analysis and visualization of exploration geochemical data. *Earth Science Reviews*. 2016. Vol. 158. pp. 9–18.

HYDROGEOLOGY

УДК 550.367

DOI: [10.46698/VNC.2023.40.99.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.40.99.010)

Original paper

Assessment of thermal water resources of Precaspian-Guba district and methodology of its use

A.V. Islamzade , P.Y. Mammadov 

Institute of Geology and Geophysics, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, 29a Guseyn Javid Str., Baku AZ1143, Azerbaijan,
e-mail: aygulislamzade.vidadi60@gmail.com

Received: 17.01.2023, revised: 16.02.2023, accepted: 22.02.2023

Abstract: The relevance In the article, the results of thermal and mineral water search and exploration conducted in Yalama, Nabran, Khudat, Khachmaz areas of the Caspian-Guba thermal water field were reviewed. **The aim** of the work is to determine the fresh and low-mineralized underground water sources of the region and their effective use, evaluation and forecasting of exploitation resources is a priority issue. **Methods.** The principle of development of deep geothermal systems and its application to the studied area were considered. So that, the produced thermal water can be used for heating local and regional heating networks and also in resort hotels, industrial complexes and residential buildings. Conversion of heat into electrical energy is possible with additional technologies such as Organic Rankine Cycle (Rankine Cycle) units or Kalina units at temperatures above approximately 80°C. Therefore, economically efficient production requires a temperature of 120°C or higher. Organic Rankine Cycle (ORC) plants operate with lower boiling temperature due to the use of an organic heat transfer liquid. The vapor phase of this liquid passes through a turbine and drives the electric generator. Kalina plants use an ammonia-water mixture as the heat carrier. **Results.** Based on the results of numerous measurements, a graphical representation of the research area was created in the Grapher program and a temperature and discharge distribution map was created in the Surfer program. The geothermal energy potential brought by the wells dug in the Nabran, Khudat, Khachmaz zone was calculated and the prospect of using this energy was determined. In the Nabran, Khudat and Khachmaz areas, and in the upper productive aquifer complex, the calculated operational reserves of important therapeutic mineral waters and thermal waters as a type of thermal energy are more than 30,000 m³/day in categories A, B, and C₁.

Keywords: thermal waters, hydrogeological features, geothermal energy, deep geothermal systems, dual well system.

For citation: Islamzade A.V., Mammadov P.Y. Assessment of thermal water resources of Precaspian-Guba district and methodology of its use. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. 13(1): 136-149. DOI: 10.46698/VNC.2023.40.99.010.

DOI: [10.46698/VNC.2023.40.99.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.40.99.010)

Оригинальная статья

Оценка ресурсов термальных вод Прикаспийско-Кубинского региона и методика ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

А.В. Исламзаде , П.Я. Мамедов 

Институт геологии и геофизики, Министерство науки и образования Азербайджанской Республики, Республика Азербайджан, AZ1143, г. Баку, ул. Г. Джавида, 20а,
e-mail: aygulislamzade.vidadi60@gmail.com

Статья поступила: 17.01.2023, доработана: 16.02.2023, принята к публикации: 22.02.2023

Резюме: Актуальность работы. В статье рассмотрены результаты поисков и разведки термальных и минеральных вод, проведенных на Яламинской, Набранской, Худатской, Хачмазской площадях Каспийско-Кубинского бассейна термальных вод. **Цель работы.** Определение источников пресных и слабоминерализованных подземных вод региона, а также их эффективное использование; оценка и прогнозирование эксплуатационных ресурсов являются приоритетными задачами. **Методы исследования.** Рассмотрен принцип разработки глубинных геотермальных систем и его применение к исследуемому региону. Таким образом, добытая термальная вода может быть использована для обогрева местных и районных тепловых сетей, а также в курортных отелях, промышленных комплексах и жилых домах. Преобразование тепла в электрическую энергию возможно с помощью дополнительных технологий, таких как установки с органическим циклом Ренкина (цикл Ренкина) или установки Kalina при температурах выше примерно 80°C. Конечно, для экономически продуктивного производства требуется температура 120°C и выше. Установки с органическим циклом Ренкина работают при более низкой температуре кипения, благодаря органическим теплоносителям. Паровая фаза жидкости в теплоносителе проходит через турбину и приводит в действие электрогенератор. Установка Kalina применяет аммиачно-водную смесь в качестве теплоносителя. **Результаты работы.** По результатам многочисленных измерений в программе Grapher создано графическое представление района исследований и в программе Surfer создана карта распределения температуры и расхода. Рассчитан геотермальный энергетический потенциал скважин, пройденных в Набранской, Худатской, Хачмазской зонах, и определена перспектива использования этой энергии. На Набранском, Худатском и Хачмазском участках и в верхнем продуктивном водоносном комплексе расчетные эксплуатационные запасы важных лечебных минеральных вод и термальных вод как вида тепловой энергии составляют более 30 000 м³/сут по категориям А, В и С₁.

Ключевые слова: термальные воды, гидрогеологические особенности, геотермальная энергия, глубинные геотермальные системы, двухскважинная система.

Для цитирования: Исламзаде А.В., Маммадов П.Я. Оценка ресурсов термальных вод Прикаспийско-Кубинского региона и методика их использования. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(1): 136-149. DOI: 10.46698/VNC.2023.40.99.010.

Introduction

Groundwater is one of the most common and exploited minerals. Identifying and efficient use of sweet and low-mineral groundwater sources in each region requires evaluation and forecasting of their reserves. Hydrodynamic, hydraulic, balance, hydrogeological analog, and expert evaluation methods are used in groundwater reserves forecasting.

High-temperature underground water is called thermal water. Thermal water is classified into absolute types based on temperature, which is higher than the average annual air temperature in the relevant area – relative (cold waters with a temperature less than 20°C can also form this type of water) and absolute, temperature 20-37°C (higher than the average maximum air temperature on the Earth and higher than the normal temperature of the human body). The temperature regime of subsurface waters is dependent on both the endogenous heat of the Earth surface and the exogenous heat related to the climate of the relevant area [Aliyev et al., 1972; Mekhtiyev, 1996]. In modern volcanic regions, these waters emerge as boiling or hot springs in the form of geysers on the Earth surface. Such waters have low mineralization degree but high alkalinity. Na predominates in the ion composition. Some types of thermal waters are called as “acrotterm” (acratotherm); and are primarily nitrogenous in gas composition. However, thermals having carbon gas, methane and hydrogen-sulfide can also be found. Nitrogen thermals are divided into three main types: 1. A type of granite that is spread on the surface and characterized by a low mineralization degree typically with less than 0.3 g/l silicon, high levels of radon, and some trace elements; 2. A type of volcanic rock found in shale and sandstone that is characterized by the presence of hydrogen sulfide; 3. A type of sedimentary rock found in carbonate (conglomerate, dolomite, etc.) deposits characterized by high mineralization levels [Aliyev et al., 2006].

Scientific and practical researches are conducted in many developed countries for the resolution of the problems related to the use of alternative (wind, thermal waters, etc.) energy sources. The high-temperature thermal waters are also characterized as accumulators of thermal energy due to their high heat-energy capacity.

Geothermal energy is an inexhaustible source of heat energy throughout the human lifetime. Its use is harmless to the environment and provides the base load of energy. This energy source is not dependent on weather conditions and operates 24 hours a day, 7 days a week. The use of geothermal energy increases regional and local products, reduces dependence on traditional energy sources and helps preserve valuable chemical reserves for the future. Deep geothermal reserves can potentially provide reliable heat and electrical energy for the future.

Materials and methods

Deep geothermal systems [Stober, Bucher, 2013]. Deep geothermal systems include low-enthalpy hydro-geothermal systems that utilize heat from hot water or steam reservoirs in deep aquifers (Figure 1). The heat storage is directly used by the heat exchanger or sometimes through a heat pump. The produced thermal water can be used for heating local and regional heating networks and also in resort hotels, industrial complexes and residential buildings. Conversion of heat into electrical energy is possible with additional technologies such as Organic Rankine Cycle (Rankine Cycle) units or Kalina units at temperatures above approximately 80°C. Therefore, economically efficient production requires a temperature of 120°C or higher. Organic Rankine Cycle (ORC) plants operate with lower boiling temperature due to the use of an organic heat transfer liquid. The vapor phase of this liquid passes through a turbine and drives the electric generator. Kalina plants use an ammonia-water mixture as the heat carrier [Kalina, 1984; Ibrahim, 1996]. Kalina systems withdraw less thermal energy from the thermal water than ORC systems but convert it to electrical power with higher efficiency. In the low temperature range ORC systems suffer

from low thermal efficiency that follows from a high auxiliary power requirement of the cooling system, especially when air cooled [Park, Sonntag, 1990].

The most commonly used form of hydro-geothermal resources is the two-well hydrothermal system. The system is based on two wells; one of them is the production well that carries hot water from the geothermal aquifer to the surface, and the other well is used to inject cooled water back into the ground. The thermal energy of hot water in the geothermal aquifer is transferred to a suitable fluid via a heat exchanger. Thermal energy cannot be completely transferred and converted into electrical energy. The hot water is typically cooled to around 55-80°C, and accordingly, most of the thermal energy remains in the thermal water. In case, if there are specific demand and the necessary infrastructure is built, it is possible to utilize the residual heat. The economic success of the power plant largely depends on the sale of residual heat.

The cooled water is returned to the injection well together with the residual heat. The filter sections of the dual well are located at precisely determined distances from each other (Fig. 1).

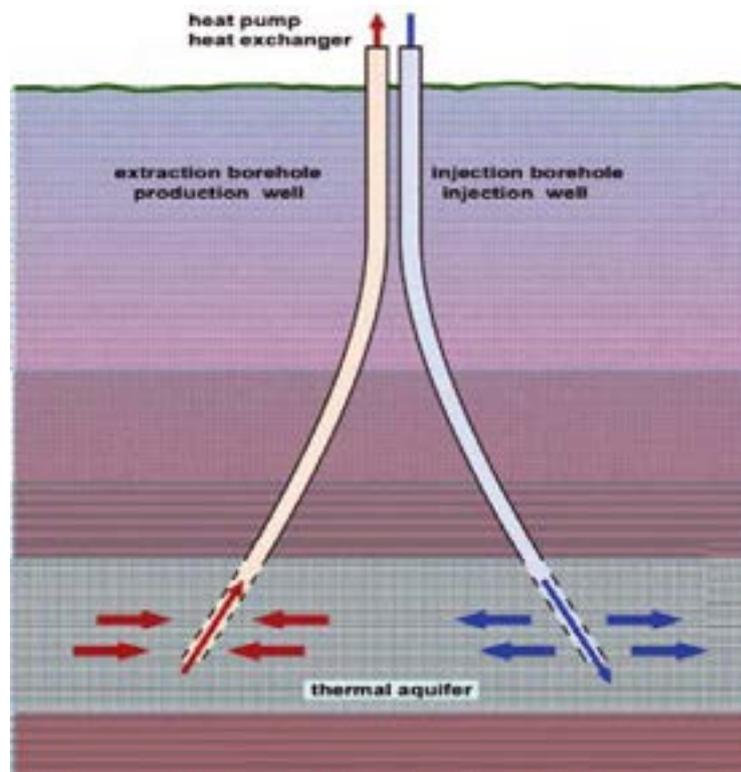


Fig. 1. Underground design of a deep geothermal open system installation (doublet, 1 producer, 1 injector) [Stober, Bucher, 2013]

Depending on the geological conditions, an injection pump may be required. There are several reasons for the return of produced water during the closed loop (reproduction): so, that the natural refilling of deep aquifers is a very long process. Thus, it is necessary to ensure the refilling of water reservoirs. Hydrogeothermal plant pumps a large amount of water, so it is necessary to be sure of the alteration of the extracted water. Re-injection of cold water is beneficial from both economical and practical viewpoints, because water often contains high concentrations of dissolved substances and gases. Due to the wastewater management, it is useful to inject the water back into the initial water storage tank.

The Riehen plant located near Basel (Switzerland), which has been continuously providing heat energy to residential areas in Switzerland and nearby Germany since its commissioning in 1994, can be mentioned as an example of geothermal binary system. The two wells are located at a distance of 1 km from the residual water reservoirs at a depth of 1547-1247 m, correspondingly (Fig. 2).

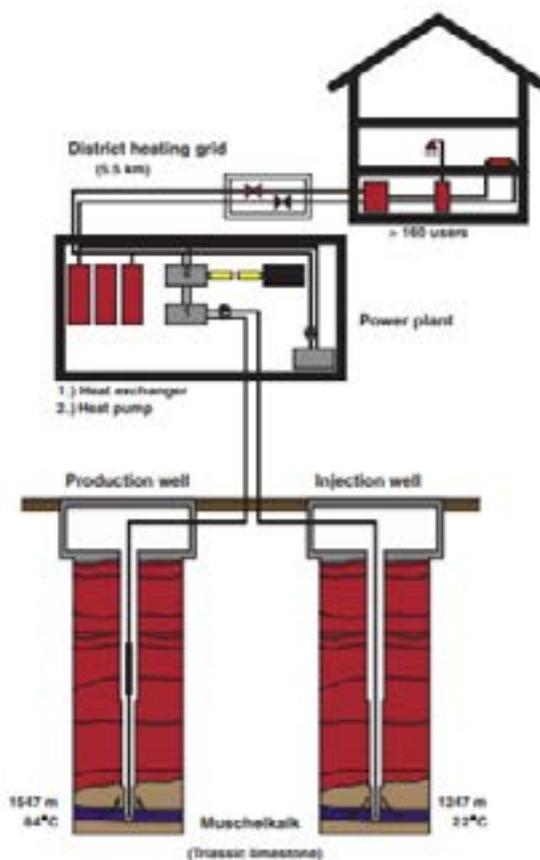


Fig. 2. The hydrogeothermal binary system at Riehen (Basel, Switzerland), redrawn from documents of Gruneko Corp [Stober, Bucher, 2013]

A hydrogeothermal binary system consisting of a production and an injection well can be drilled obliquely from a single drilling point. This reduces the land required for surface plant construction. Underground, the bottom of the hot water aquifer is typically 1000-2000 m apart from each other. An optimal distance between the wells must be determined prior to drilling through the system's numerical modeling. If the wells are too close together, there is a risk of thermal short-circuit. This means that the cooled recycled water can reach the production well too quickly and in turn, cool the geothermal water. On the other hand, the wells should not be too far apart, as the production well cannot get hydraulic support from the injection well in this case. Thus, the filling of the fluid reservoir depends on the reflux of the cooled water. The heated water after being pumped and cooled down is stored in a closed system that allows maintaining a specific pressure. This is necessary to prevent or minimize buildup of high mineralized and gas-rich fluids in the equipment due to pressure drop and gas loss. Calcium carbonates (calcite-aragonite) are the most typical and widespread scales. The release of CO₂ gas from the pumped hot water leads to the precipitation of carbonates in the piping system. Even though carbonates are more soluble in cold water, the loss of CO₂ is more influenced by pressure than tempera-

ture. In closed pipe systems, the pressure can be adjusted to prevent degassing and scale formation. In some areas, a strong acid (such as hydrochloric acid) or small amounts of other chemicals (organic inhibitors) may be required to prevent scale formation. Geothermal power plants usually use two types of pumps: Submersible electric pumps (SEP) and surface-mounted line shaft pumps (SLSP). The pumps used to bring the hot liquid to the surface must be resistant to high pressure and corrosion and, therefore, it is considered the most important component of the geothermal power plant. The SEP raises the hot liquid to the surface, to the heat exchanger, under the influence of centrifugal force. The extracted thermal energy can then be converted into electricity or fed directly into the central heating network. Improves energy efficiency by reducing combined power and heat emissions. The combined power and heat increase energy efficiency by reducing emissions. They are particularly environmentally friendly and economically viable. Consequently target temperature is 200 °C and beyond. The hot rocks, usually crystalline basement (granites and gneisses), function as a heat exchanger. Heat transfer to the surface is achieved by natural water present in the fracture pore space of the basement [Stober, Bucher 2007a, b; Bucher, Stober, 2010]. In crustal sections with average geothermal gradients, 5–7 km deep wellbores are necessary to reach the required rock temperatures. The crystalline basement of the continental crust is generally fractured in its upper part. The fractures are the result of failure of stressed rocks in the brittle deformation regime in the uppermost about 12 km thick layer of the Earth. The fractures are flow paths for advective water transport. The hydraulic properties of the fractures depend on fracture aperture, surface roughness of fracture surfaces, connectivity and frequency of fractures and other parameters [Caine, Tomasiak, 2003]. The hydraulic behavior of the fractured basement corresponds to an infinite homogeneous low-conductivity aquifer (aquitard). High-pressure injection of water into the borehole increases the aperture of natural fractures and unlocks partly sealed fractures therefore improving the hydraulic conductivity.

The use of thermal water through dual systems (two-phase systems) for heating purposes can often be considered feasible using hydrothermal binary systems. Geothermal plants operating with them have been used for years and are currently used all over the world.

Special kinds of geothermal plants are used in balneological resorts using thermal deep waters. Along with the use of hot water in baths and pools, the pumped thermal water is also used for the heating of buildings in local areas. After the use, the wastewater are cleaned, but not reinjected into the aquifer.

Hydro-geothermal systems include thermal fluid reservoirs and crack and fracture zones with high permeability in sedimentary masses.

In addition to the low-enthalpy geothermal systems presented above, the high-enthalpy steam or two phase systems are used for the generation of electric and heating energy.

Deep geothermal wells are, in principle, a form of oil-thermal systems. Here, heat energy is extracted from any type of rock or rock sequence by using a closed circuit of heat transfer fluid in the deep well. Deep geothermal wells are used only for heat supply. Currently, it is not possible to generate electricity with the available technology due to the relatively low temperature of the wells.

The technology of deep geothermal wells can be compared with near-surface geothermal well technology. The geothermal heat carrying fluid in deep wells circulates in a single borehole up to 3000m depth. The system doesn't require conductive rock formations at depth and can be installed anywhere. The existing abandoned wells are

particularly suitable for installing deep geothermal wells. The heat production of deep geothermal well can range up to 500 kVt depending on local conditions.

Heat transfer from hot rocks occurs by heat transmission from the solution of the probe and corpus to the conducting fluid. Ammonia is a commonly used heat transfer fluid. The cold liquid slowly flows down the ring of the double tube system and is gradually heated by the surroundings. The downward flow rate is typically 5-65 m/s. In a thermally insulated central pipe, thermal energy is lifted to the surface by the heated fluid. In a surface heat exchanger, heat is removed from the hot fluid. The cooled liquid (15°C) is pumped back into the loop. The heat extracting process cools the subsoil near the well. The amount of the heat produced from the deep well is primarily dependent on the temperature of the ground. Therefore, areas with positive heat anomalies are particularly profitable from economical viewpoint. Additional parameters affecting the productivity of deep wells include the thermal characteristics of ground, especially heat conductivity, overall operating time, well's technical design, and thermal properties of the used corpus and screen materials. Long and large diameter wells have greater heat exchange surfaces.

The structure of deep aquifers is often characterized by transition or mixed properties between hydrogeothermal and petrothermal (oil-thermal) systems. The future applications of deep geothermal energy sources include the extraction of heat from deep underground mines and thermal energy from boreholes, and storing them in deep geological structures.

Geothermal energy sources of Azerbaijan

Azerbaijan has abundant potential of alternative energy sources. In terms of geothermal, the Greater Caucasus region is particularly abundant with low-temperature geothermal fields. In most parts of the area, this parameter is evaluated as not more than 30mW/m², only in the south-eastern part-Siyazan monocline the heat flux reaches 50mVt/m². The increase of heat flux in a regional scale towards the east and south is related to the approach of Siyazan regional fault to the transition zone of the Great Caucasus geosynclinal deformation zone [Mekhtiev, 1970; Huseynov et al., 1970; Aliyev, 1988; Aliyev et al., 1996; Aliyev et al., 2002; Mukhtarov, 2004; Gubanov, 2022]. Due to its geological and geomorphological characteristics, Azerbaijan has sufficient reserves in terms of thermal water sources. As a result of the conducted research, more than 1000 thermal water deposits with a total reserve of more than 245,000 m³/day have been identified in Azerbaijan [Mammadova, 2016].

In total, the forecasted reserves of thermal waters of the Caspianriperian-Guba zone – Jurassic, Cretaceous, Maikop and Absheron sediments are estimated at 81.4 thousand m³/day.

During the years from 1983 to 1996, exploration and prospecting of thermal and mineral waters was carried out in the Yalama, Nabran, Khudat, Khachmaz, Guba and Gusar areas of the Gaspiariparian-Guba thermal water deposit and positive results were obtained.

As a result of the hydrogeological tests carried out in the wells dug in the mentioned areas, underground thermal and mineral waters with high flow rate and temperature were discovered in the Middle Jurassic, Upper Cretaceous and upper productive layer aquifer complex.

The main purpose of the hydrogeological regime observations conducted in the wells dug in the Nabran, Khudat and Khachmaz areas in 1998-2000 years, was: regular study of the changes in the water level, flow rate, temperature, mineralization degree,

chemical and gas composition of the wells depending on the natural factors (geological, hydrogeological, hydrodynamic characteristics of the area, the interconnection of water horizons, ways of recovery of underground water resources and changes in the balance); consistent monitoring the technical conditions of the wells; implementing the necessary technical measures and finally preventing the changes that may occur in the ecological balance of the region [Mekhtiev et al., 1960; Muradov, Salahov, 1998; Muradov et al., 2001; Sazonov et al., 2022].

The underground thermal waters of the Lower Cretaceous water complex were studied in the wells drilled in the Khudat area at depths of 2275-2040 and 2541-2348 meters. The water flow was 76.2-316.6 m³/day, with a temperature of 38-64°C.

The groundwater thermal waters of the Upper Cretaceous water complex have been studied in the Khudat area in the thermal water well with a depth of 2837-2228 m. The flow rate of the water was 6000 m³/day, and the temperature is 85 °C.

The groundwater thermal waters of the lower productive aquifer complex were explored in the Yalama region at depths of 1192-972 m with 35°C temperature, 1140-945 m with 41°C temperature. In the Nabran region, the thermal waters were explored at depths of 1609-1483 m with 42°C temperature, 1845-1516 m with 54°C temperature and 1915-1648 m with 39°C temperature. In the Khudat region, the thermal waters were explored at depths of 1853-1624 m with 40°C temperature, 1676-1426 m with 38°C temperature and 1526-1406 m with 50°C temperature. In the Khaçmaz region, the thermal waters were explored at depths of 2477-1640 m with 45°C temperature and 1800-1660 m with 41°C temperature in the drilled wells.

The groundwater thermal water of the upper productive aquifer complex in Nabran was determined at depths of 1463-1140 m with 42°C, 1466-1287 m with 45°C, 1480-1250m with 46°C, and 1614-1342 m with 39°C. In Khudat, the temperature was measured at depths of 1360-1182 m with 48°C, 1360-1170 m with 54°C, and 1426-1208 m with 60°C. In Khachmaz, the temperature was measured at depths of 1615-1557 m with 60°C, 1515-1420 m with 52°C, and 1624-1473 m with 52°C.

Aghchagil fluid complex. The underground waters of this fluid complex have been determined in mineral wells in the Nabran area at temperatures of 38°C for depths of 1124-931 m, 45°C for depths of 1231-993m, 45°C for depths of 1224-1028 m, and 36°C for depths of 1203-996 m. In thermal wells of the Khudat area, temperatures have been determined to be 50°C for depths of 1371-1260 m and 38.5°C for depths of 1512-1260 m.

The underground waters of the Absheron water complex have been discovered in mineral wells 6, 7, 9, and 10 in the Nabran area at depths of 1006-732 m. The flow rate of the waters is 5-172.8 m³/day, and the temperature was 31-34°C.

Quaternary aqueous complex. Groundwater is very widespread in this zone and consists of New Khazar, Khvalin, Khazar, Baku and Turkan floors. In this water complex, both ground and pressure waters with different flow rate (5-55 l/sec) and mineralization degree (0.51g/l) are distributed.

As a result of hydrogeological tests (up to 12 wells) and monitoring in thermal wells drilled in Khudat and Khachmaz areas, changes have occurred in the hydrogeological indicators (flow rate, temperature, dynamic and static levels, chemical and gas compositions) of the developed waters in the upper productive aquifer complex to a noticeable degree.

It was found that there is a little difference when comparing the hydrogeological results obtained during the initial testing phase in the wells with those obtained during the monitoring phase.

Thus, as a result of hydrogeological monitoring carried out in wells drilled into thermal waters in the Khudat and Khachmaz areas, the hydrogeological properties of groundwater in the upper productive aquifer complex have been clarified, and its potential for profitable use in various fields (heating systems and balneology purposes) has been confirmed once again.

In addition, it was revealed that the studied wells are technically useful, and it is possible and expedient to continue hydrogeological monitoring on them [Muradov et al., 2001].

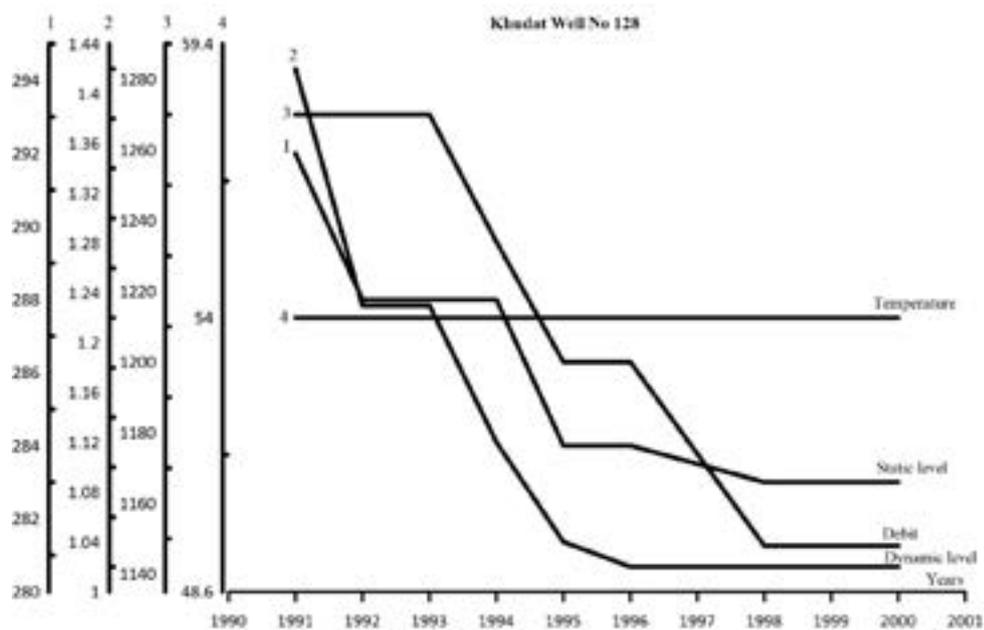


Fig. 3. The changes in temperature, debit, static and dynamic levels in well №124 in the Khudat field in 1990–2001 years.

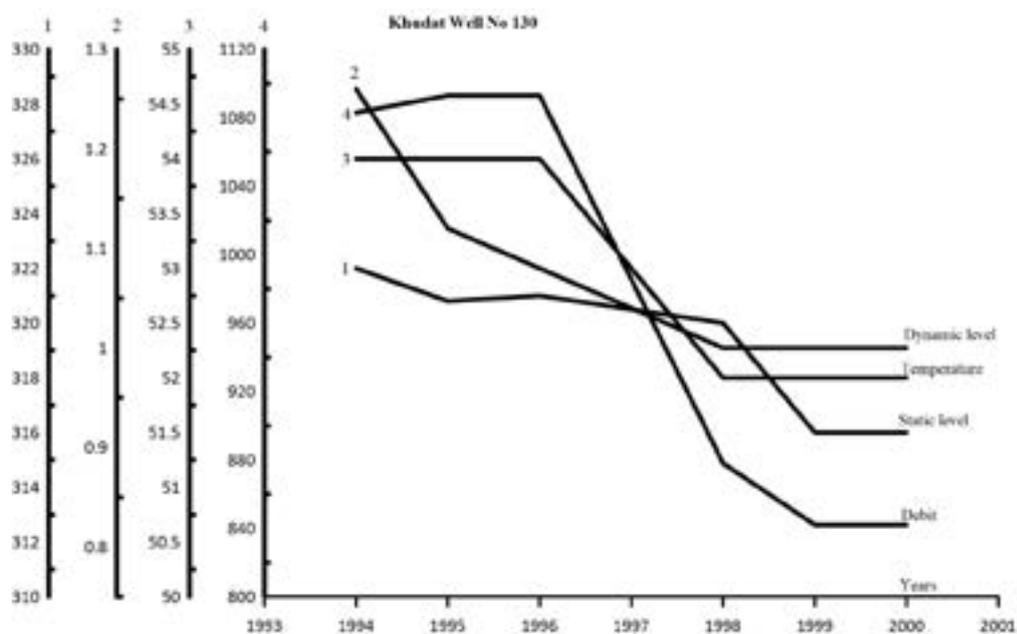


Fig. 4. The changes in temperature, debit, static and dynamic levels in well №128i in the Khudat field in 1990–2001 years.

Hydrogeological analysis performed in the upper productive aquifer complex have revealed that the flow rate, temperature, and chemical composition of the waters of this area are suitable for direct use, as well as for the use of balneology and agricultural purposes. The flow rate and temperature of the deep-lying aqueous complex create the basis for sufficient energy potential in the upper part of the productive layer. The hydrogeological characteristics of the upper productive aquifer complex in Nabran, Khudat, Khachmaz areas are given in Table 1.

Table 1

Hydrogeological characteristics of the upper productive layer aquifer complex

Observation area	Number of wells	Hydrogeological testing intervals, m	Flow rate of the well, m ³ /day	Water temperature, °C	Degree of mineralization of water, g/l	Chemical composition of waters
Nabran	6	1463-1140	178.4	42	9.90	Cl-SO ₄ ,Na
“	7	1480-1250	254.1	46	4-8	“
“	9	1466-1287	261.8	45	5.1	“
“	12	1614-1342	170	39	6.85	Cl, Na
Khudat	123	1360-1182	520.4	48	3.4	“
“	124	1356-1180	2400	54	1.7	Cl-SO ₄ ,Na
“	126	1360-1170	2009.4	54	8.9	Cl, Na
“	127	1426-1208	6171.4	60	4.7	“
“	128	1570-1367	1148	54	4.4	“
“	116 ³	1616-1310	2618	54	4.7	“
Khachmaz	115	1615-1557	960	60	8.3	“
“	129	1550-1420	884	52	4.2	SO ₄ -Cl, Na
“	130	1624-1473	842	52	4.9	Cl-SO ₄ , Na

Results

The thermal energy (outlet) brought from within the Earth by hot springs is evaluated based on its flow rate. If we express the flow rate as $q=m/t$, water with mass m brings $m=qt$ energy. The heat amount $Q=mc\Delta T$ and it can be expressed as $Q=qt c\Delta T$. Hence, we can find the the average heat amount (heat power) brought by thermal waters per unit time.

$$W = Q/t = qc\Delta T.$$

Based on the abovementioned, we can calculate the energy for the areas given based on Table 1.

In Nabran area, energy potential per one day in wells №7 and №9 will be:

$$W_7 = 254.1 * 4200 * (46 - 16) = 32.016.600 \text{ Vt} = 32.017 \text{ kVt}$$

$$W_9 = 261.8 * 4200 * (45 - 16) = 31.887.240 \text{ Vt} = 31.887 \text{ kVt}$$

Here, the heat capacity of water is $c=4200 \text{ J/K}$, ΔT is the difference in temperature between the temperature of the water at the outlet of the well and the temperature of the air at the time of measurement, and q is the flow rate of the water.

Energy potential per one day in wells №124 and №127 in Khudat area will be:

$$W_{124} = 2400 * 4200 * (54 - 16) = 383.040.000 \text{ Vt} = 383.040 \text{ kVt}$$

$$W_{127} = 6171.4 * 4200 * (60 - 16) = 1.140.474.720 \text{ Vt} = 1.140.475 \text{ kVt}$$

The energy potential per one day in wells №115 and №130 in Khachmaz area will be.

$$W_{115} = 960 * 4200 * (60 - 16) = 177.408.000 \text{ Vt} = 177.408 \text{ kVt}$$

$$W_{130} = 842 * 4200 * (52 - 16) = 127.310.400 \text{ Vt} = 127.310 \text{ kVt}$$

If we assume the average monthly energy consumption of an house is 150 kWh, and the daily consumption is $150/30 = 5 \text{ kWh}$, then for example, $32.017/5 \approx 6$, $31.887/5 \approx 6$, $383.040/5 \approx 77$, $1.140475/5 \approx 228$, $177.408/5 \approx 35$, $127.310/5 \approx 25$.

As it is seen, the calculated geothermal energy potential based on the drilled wells in Nabran, Khudat, and Khachmaz zones provides energy for a certain number of homes. However, it should be noted that we have only given examples based on two wells for each zone. In this case, the number of homes supplied with energy and the energy potential will increase.

In the studied region, the use of thermal waters as a type of thermal energy in relatively large settlements such as Khachmaz, Khudat and other settlements would enable the saving of oil, gas, electricity, firewood and coal, and the damage to the environment would decrease.

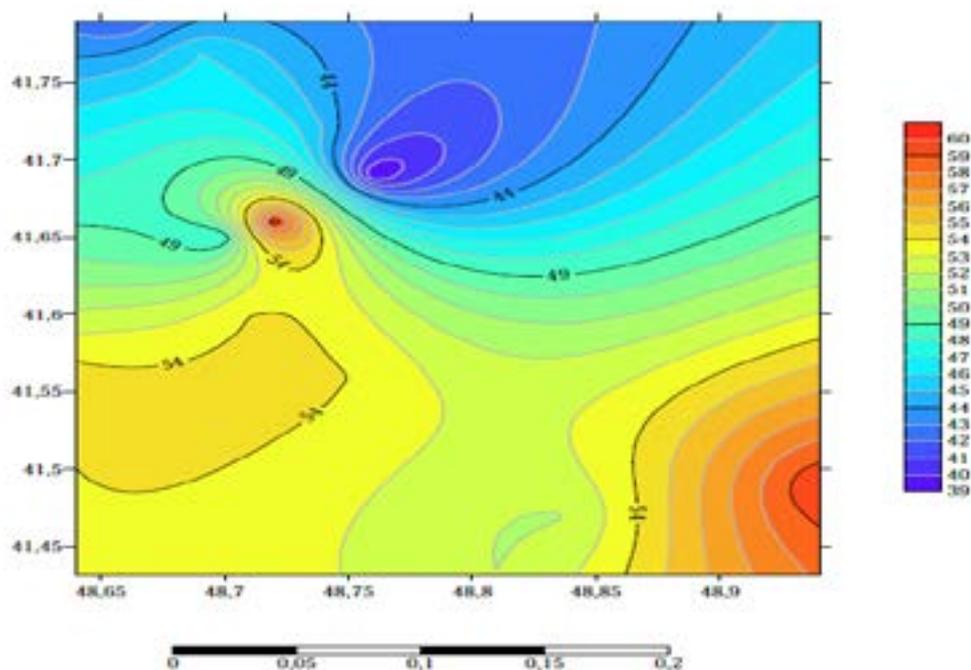


Fig. 5. Temperature distribution map for Nabran, Khachmaz, Yalama and Khudat areas

It should be noted that in Nabran, Khudat, and Khachmaz areas, and in the upper productive aquifer complex, the exploitation reserves calculated for the medicinal and thermal waters, which are considered as a type of heat energy, are more than 30,000 m³ per day in categories A, B, and C1.

The use of such amount of water should be implemented at the state level or by large companies, which will allow for effective utilization of thermal and mineral waters, proper geocological and hydrogeological control and compliance with sanitary-hygienic norms. The distribution map of temperature and debit in the Caspianriperian-Guba area was developed using the Surfer program.

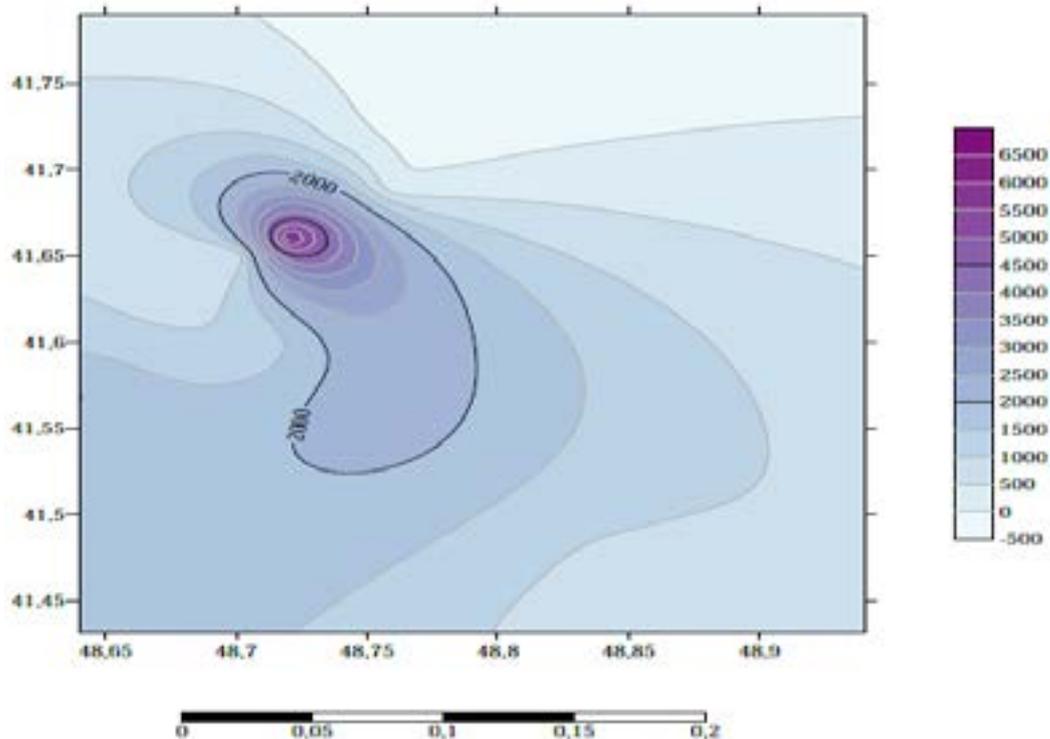


Fig. 6. Debit distribution (change) map for Nabran, Khachmaz, Yalama and Khudat areas

It is known that thermal energy (geothermal energy) is abundant on the Earth and it can be used under certain conditions. In some cases (volcanic eruptions, thermal springs, pressure of thermal water wells, etc.), this energy comes to the Earth's surface by natural ways. On the other hand, despite the fact that there is a significant amount of geothermal energy per square meter in the deep layers of the Earth, its use is accompanied by many problems, among which the delivery of geothermal energy from the depth to the surface is the main one. This, in turn, is one of the most important factors determining the profitability and efficiency of geothermal energy.

Recently, the efficiency of thermal energy use depends mainly on the deep drilled wells. However, there are many unused exploratory wells in Azerbaijan, which can be rehabilitated and used for the production of geothermal energy with small investment.

Conclusion

Based on hydrogeological regime observations carried out in the productive well complex in the Nabran-Khudat and Khachmaz areas of the Caspianriperian-Guba region, the changes occurred over time in the flow rate, temperature, dynamic and static levels,

mineralization degree, and chemical composition of underground waters depending on the natural factors have been investigated.

Based on the results of hydrogeological works carried out, it should be noted that:

1. When comparing the results of the first hydrogeological tests carried out in the upper productive aquifer complex with the results obtained during the regime observations, it was found that there is no noticeable difference in the hydrogeological properties of groundwater. This also gives priority to consider that groundwater has a stable regime and that calculated reserves of thermal waters are natural reserves.

2. In the Nabran, Khudat and Khachmaz areas, and in the upper productive aquifer complex, the calculated operational reserves of important therapeutic mineral waters and thermal waters as a type of thermal energy are more than 30,000 m³/day in categories A, B, and CI.

3. The presence of valuable chemical elements, including high-concentration of iodine and bromine, revealed in the Middle Jurassic, Cretaceous and Lower Productive layers and upper productive aquifer complex, allows for comprehensive utilization of these waters.

4. The main source of the environmental contamination in the research areas is both thermal and mineral waters with various physical and chemical compositions flowing from wells. Especially, the waters located in the Middle Jurassic, Cretaceous and Lower Productive layers and upper productive aquifer complexes are characterised by high degree of mineralization and contain a number of harmful elements and compounds. Therefore, the specified water wells (№112 and №116 in the Khudat area, №121 in the Gusar area and №110 in the Yalama area) should be permanently closed.

References

1. Aliyev S.A. Geothermal fields of the South Caspian depression and their connection with oil and gas potential. Baki. Geol. Inst. Azerb. Acad. Sci. 1988. 28 p. (In Russ.)
2. Aliyev S.A., Mukhtarov A.Sh., Aliyeva Z.A. Results of geothermal research. In: Geophysical Investigations in Azerbaijan. Baku. Sharg-Gharb, 1996. pp. 381-386.
3. Aliyev S.A., Mukhtarov A.Sh., Aliyeva Z.A., Bagirli R.J. Geothermal research in Azerbaijan. In: Geology of Azerbaijan. Vol. V. Physics of the Earth. Baku. Nafta-Press, 2002. pp. 229-263. (In Russ.)
4. Aliyev S.A., Salaev S.G., Efendiev D.I., Karakashly V.L., Akhmedova H.A. Geothermal characteristics of the Caspian-Kuban region in connection with the assessment of oil and gas potential prospects. Sov. Geology. 1972. No12. p. 133-138. (In Russ.)
5. Aliyev G.A. et al. Explanatory dictionary of geological terms. Azerbaijan National Academy of Sciences Institute of Geology, Terminology Commission. Baku. Nafta-Press, 2006. 680 p.
6. Bucher K., Stober I. Fluids in the upper continental crust. Geofluids. 2010. Vol. 10. pp. 241–253.
7. Caine J.S., Tomusiak S.R.A. Brittle structures and their role in controlling porosity and permeability in a complex Precambrian crystalline-rock aquifer system in the Colorado Rocky Mountain Front Range. GSA Bulletin. 2003. Vol. 115(11). pp. 1410–1424.
8. Gubanov R.S. Assessment of the state of water protection zones of the Central Caucasus, on the example of water bodies of the Krasnogvardeysky Municipal District of the Stavropol Territory using remote sensing methods of the Earth. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No.3. pp. 157-169. DOI: 10.46698/VNC.2022.95.62.011 (in Russ.)
9. Huseynov G.A., Saikin E.M., Plyushch A.M. To the study of geothermy of the Siyazan oil and gas region. ANKh. 1970. No.5. pp. 13-14. (In Russ.)

10. Ibrahi, O.M. Design Considerations for Ammonia-Water Rankine Cycle. *Energy*. 1996. Vol. 21. pp. 835–841.
11. Kalina A.L. Combined-cycle system with novel bottoming cycle. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1984. Vol. 106. pp. 737–742.
12. Mammadova A.V. Geothermal energy potential of the Pliocene complex of the Absheron Peninsula. Baku. 2016. 133 p.
13. Mehdiyev Sh.F., Abdullayev R.N., Alizade A. et al. Dictionary of geological terms. Institute of Geology of the Azerbaijan Academy of Sciences, Azerbaijan State Oil Company, Azerbaijan State Geology and Mineral Resources Committee. Baku. Elm, 1996. 360 p.
14. Mekhtiev Sh.F., Mirzajanzade A.Kh., Aliyev S.A. et al. Thermal regime of oil and gas fields. Baku. Azorneftneshr, 1960. 384 p. (In Russ.)
15. Mukhtarov A.Sh. Thermal field of the Caspian Sea. In: *Geology of the regions of the Caspian and Aral Seas*. Almaty. Kazakhstan Geological Society «KazGEO», 2004. pp. 195-200.
16. Muradov T.D., Salahov C.Sh. The report of the Caspian hydrogeological exploration team on the results of the precise exploration works carried out on thermal waters in Khudat-Khachmaz areas in 1990-1998. Baku, 1998
17. Muradov T.D., Salahov S.Sh., Agasiyev A.A. Results of conducting hydrogeological regime and maintenance works in 1998-2000 in wells dug for mineral and thermal waters in Yalama, Nabran, Khudat, Khachmaz, Guba, Gusar areas of the Caspian-Guba region. Baku, 2001
18. Park Y.M., Sonntag R.E. A Preliminary Study of the Kalina Power Cycle in Connection with a Combined Cycle System. *International Journal of Energy Research*. 1990. Vol. 14. pp. 153–162.
19. 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. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No.1. pp. 117-130. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.47.009 (in Russ.)
20. Stober I., Bucher K. Hydraulic properties of the crystalline basement. *Hydrogeology Journal*. 2007a. Vol. 15. pp. 213–224.
21. Stober I., Bucher K. Erratum to: Hydraulic properties of the crystalline basement. *Hydrogeology Journal*. 2007b. Vol. 15. p. 1643.
22. Stober I., Bucher K. Geothermal energy, from theoretical models to exploration and development. Springer. 2013. p. 290.

УДК 551.435.627

DOI: [10.46698/VNC.2023.69.79.011](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.69.79.011)

Оригинальная статья

Расчет устойчивости грунтовых откосов при помощи методов нелинейной оптимизации

В.Ф. Акопян , Б.М. Языев , А.С. Чепурненко 

Донской государственный технический университет, Россия, 344003, г. Ростов-на-Дону,
пл. Гагарина, 1, e-mail: anton_chepurnenk@mail.ru

Статья поступила: 20.01.2023, доработана: 21.02.2023, одобрена в печать: 27.02.2023

Резюме: Актуальность работы. Совершенствование методов расчета устойчивости грунтовых откосов представляет собой важную задачу, решение которой необходимо при размещении зданий и сооружений на склонах для предотвращения оползневых процессов. В большинстве существующих методов расчета поверхность скольжения оползневого тела принимается круглоцилиндрической, что не всегда соответствует реальной картине. **Цель работы:** разработка методики расчета коэффициента устойчивости грунтовых откосов на основе метода предельного равновесия с использованием алгоритмов нелинейного программирования. **Методы исследования.** Решение выполняется в двумерной постановке. Линия скольжения отыскивается в виде полиномов второй и третьей степени, а также кусочно-линейной функции. Задача поиска линии скольжения ставится как задача нелинейной оптимизации. В качестве целевой функции выступает коэффициент устойчивости грунтового откоса, который для истинной поверхности скольжения должен достичь минимума. Определение коэффициента устойчивости выполняется методом касательных сил. Варьируемыми параметрами выбраны абсциссы точек пересечения свободной поверхности грунта с нижней поверхностью оползневого тела, а также промежуточные ординаты точек линии скольжения. Решение задачи нелинейной оптимизации выполнено в среде MATLAB с использованием пакетов Optimization Toolbox и Global Optimization Toolbox. Для поиска минимума целевой функции применяется метод внутренней точки, позволяющий найти локальный минимум, а также метод шаблонного поиска, который позволяет найти глобальный минимум. **Результаты исследования.** Демонстрация предлагаемой методики произведена на примере однородного грунтового откоса при действии на него только собственного веса. Показана сходимость метода при использовании в качестве линии скольжения кусочно-линейной функции при увеличении числа отрезков. Выявлено существенное отличие полученной линии от дуги окружности. Установлено, что при задании линии скольжения полиномами второй и третьей степени коэффициент устойчивости оказывается несколько выше, чем в случае применения кусочно-линейной функции. Для контроля достоверности результатов координаты точек полученной ломаной линии скольжения переданы в программный комплекс GeoStab, где выполнено независимое определение коэффициента устойчивости. Также в программе GeoStab для сравнения произведен расчет устойчивости рассмотренного склона при помощи метода круглоцилиндрических поверхностей. Используются наиболее известные варианты данного метода, включая метод Феллениуса, Бишопа, Шахунянца, касательных сил, Ямбу, Спенсера, Моргенштерна-Прайса. Кроме того, произведено сравнение с конечно-элементным расчетом в программном комплексе Plaxis.

Ключевые слова: оползни, грунтовый откос, поверхность скольжения, устойчивость, нелинейная оптимизация.

Для цитирования: Акопян В.Ф., Языев Б.М., Чепурненко А.С. Расчет устойчивости грунтовых откосов при помощи методов нелинейной оптимизации. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 113(1): 150-161. DOI: 10.46698/VNC.2023.69.79.011.

DOI: [10.46698/VNC.2023.69.79.011](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.69.79.011)

Original paper

Calculation of soil slope stability using nonlinear optimization methods

V.F. Akopyan , B.M. Yazyev , A.S. Chepurnenko 

Don State Technical University, 1 Gagarin square, Rostov-on-Don 344003, Russian Federation,
e-mail: anton_chepurnenk@mail.ru

Received: 20.01.2023, revised: 21.02.2023, accepted: 27.02.2023

Abstract: Relevance. Improving the methods for calculating the stability of soil slopes is an important task, the solution of which is necessary when placing buildings and structures on slopes to prevent landslide processes. In most existing calculation methods, the sliding surface of a landslide body is assumed to be round-cylindrical, which does not always correspond to the real picture. **Aim:** development of a methodology for calculating the stability coefficient of soil slopes based on the limit equilibrium method using nonlinear programming algorithms. **Methods.** The solution is carried out in a two-dimensional setting. The slip line is found in the form of polynomials of the second and third degrees, as well as a piecewise linear function. The problem of finding the slip line is posed as a non-linear optimization problem. The objective function is the coefficient of soil slope stability, which for a true sliding surface should reach a minimum. The determination of the stability coefficient is carried out by the method of tangential forces. The abscissas of the points of intersection of the free surface of the soil with the lower surface of the landslide body, as well as the intermediate ordinates of the points of the slip line, were chosen as variable parameters. The solution of the nonlinear optimization problem was performed in the MATLAB environment using the Optimization Toolbox and Global Optimization Toolbox packages. To find the minimum of the objective function, the interior point method is used, which allows finding a local minimum, as well as the pattern search method, which allows finding the global minimum. **Results.** The demonstration of the proposed technique was carried out on the example of a homogeneous soil slope under the action of only its own weight on it. The convergence of the method is shown when using a piecewise linear function as a slip line with an increase in the number of segments. A significant difference between the obtained line and the arc of a circle is revealed. It has been established that when the slip line is specified by polynomials of the second and third degrees, the stability coefficient turns out to be somewhat higher than in the case of using a piecewise linear function. To control the reliability of the results, the coordinates of the points of the obtained polygon line were transferred to the GeoStab software package, where an independent determination of the stability coefficient was performed. Also, in the GeoStab program, for comparison, the stability of the considered slope was calculated using the method of round-cylindrical surfaces. The most famous variants of this method were used, including the method of Fellenius, Bishop, Shahunyan, tangential forces, Yanbu, Spencer, Morgenstern-Price. In addition, a comparison was made with the finite element calculation in the Plaxis software package.

Keywords: landslides, soil slope, sliding surface, stability, nonlinear optimization.

For citation: Akopyan V.F., Yazyev B.M., Chepurnenko A.S. Calculation of soil slope stability using nonlinear optimization methods. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(1): 150-161. DOI: 10.46698/VNC.2023.69.79.011.

Введение

Территории Юга России характеризуются высокой вероятностью активизации опасных геологических процессов, связанных с действием как природных, так и техногенных факторов [Свалова, 2022; Яицкая, Бригида, 2022; Zaalishvili et al., 2014a, b; 2016]. К одному из таких процессов относятся оползни.

Снижение устойчивости грунтов, приводящее к оползневым процессам, может произойти при изменении ландшафтов и рельефов, возникновении антропогенных нагрузок на грунты. Размещение зданий и сооружений на склонах требует обязательного выполнения оценки их устойчивости для соответствия требованиям безопасности. Степень устойчивости склонов как правило оценивается коэффициентом устойчивости, для определения которого существует множество расчетно-теоретических методов [Будников, 2019; Salunkhe et al., 2017; Harabinova et al., 2021; Fattahi, Zandyilghani, 2020].

Наиболее распространенными и широко применяемыми в настоящее время являются методы, основанные на предельном равновесии грунтового массива [Cala, Tlisiak, 2020; Kumar et al., 2018; Liu et al., 2019]. В большинстве таких методов поверхность скольжения оползневого тела принимается круглоцилиндрической [Бартоломей и др., 2020; Батьянова, 2020; Rotaru et al., 2022]. Однако для реальных склонов форма поверхности скольжения может заметно отличаться от кругового цилиндра [Зеркаль, 2021; Ислямова, Хорошилов, 2021]. Альтернативой методам предельного равновесия выступает конечно-элементное моделирование [Dyson, Tolooyan, 2018; Sharma et al., 2019; Cecilio, Garcia, 2022; Гайджуров и др., 2021а, б]. Для определения коэффициента устойчивости склонов выполняется их расчет в физически нелинейной постановке с последовательным снижением прочностных характеристик [Dyson, Tolooyan, 2018; Sharma et al., 2019], либо повышением удельного веса грунта и внешних нагрузок [Cecilio, Garcia, 2022] до достижения предельного состояния. Расчет методом конечных элементов по сравнению с методами предельного равновесия требует заметно больших вычислительных ресурсов.

Целью настоящей работы является разработка методики поиска поверхности скольжения оползневого тела, отличной от круглоцилиндрической, с использованием методов нелинейной оптимизации на основе метода предельного равновесия.

Материалы и методы исследования

Поверхность скольжения оползневого склона будем искать в виде кусочно-линейной функции, а также в виде полиномов второй и третьей степени. В качестве целевой функции выступает коэффициент устойчивости склона K_y , который для истинной поверхности скольжения должен достичь минимума. Для определения коэффициента устойчивости используется метод касательных сил.

В данном методе массив грунта, сползающий по некоторой поверхности, разбивается на отсеки. Взаимодействие между отсеками не учитывается. Метод касательных сил предполагает выполнение суммарного уравнения равновесия в проекции на направление скольжения, а также уравнения равновесия в каждом отсеке в проекции на нормаль к основанию.

Коэффициент устойчивости в методе касательных сил определяется из соотношения [Васин, Лехов, 2021]:

$$K_y = \frac{\sum R_i}{\sum T_i}, \quad (1)$$

где T_i – касательная проекция равнодействующей внешних сил P_i , действующих на отсек, к основанию i -го отсека, R_i – предельное значение силы сопротивления сдвигу грунта по поверхности i -го отсека.

В настоящей статье для демонстрации метода ограничимся только случаем действия собственного веса. В этом случае коэффициент устойчивости по методу касательных сил определяется по формуле:

$$K_y = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i)}{\sum_{i=1}^n (G_i \sin \alpha_i)}, \tag{2}$$

где G_i – вес i -го отсека, α_i – угол наклона основания отсека относительно горизонтальной линии, c_i и φ_i – соответственно сцепление и угол внутреннего трения грунта по основанию отсека, l_i – длина основания отсека.

Пусть поверхность грунта задается функцией $f(x)$, а нижняя поверхность сползающего массива – функцией $g(x)$. При использовании для задания поверхности скольжения кусочно-линейной функции в качестве варьируемых параметров выступают координаты x_1 и x_{n+1} точек пересечения линий $f(x)$ и $g(x)$, а также ординаты y_i ($i = 2 \dots n$) промежуточных точек (рис. 1). Абсциссы x_i промежуточных точек определяются разбиением интервала $[x_1; x_{n+1}]$ на n равных отрезков.

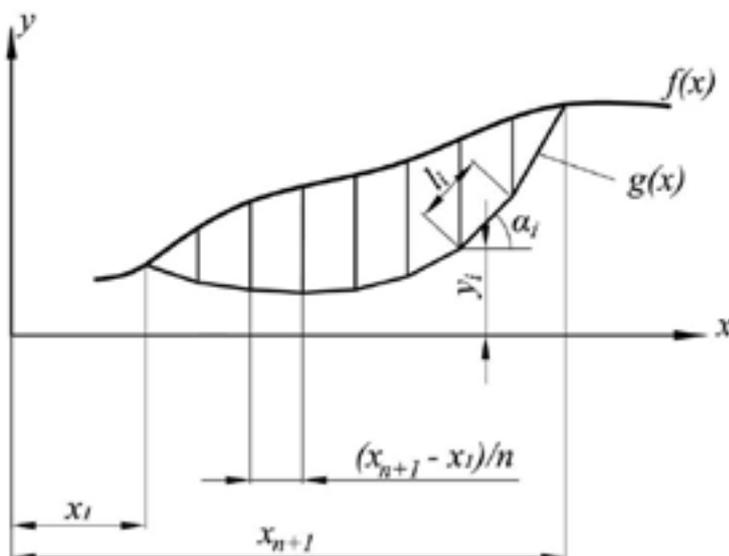


Рис. 1. К определению коэффициента устойчивости при задании поверхности скольжения кусочно-линейной функцией /

Fig. 1. To the determination of the stability coefficient when the sliding surface is specified by a piecewise linear function

На варьируемые переменные $x_1, x_{n+1}, y_2, \dots, y_n$ вводятся следующие ограничения:

$$\begin{aligned} y_i &< f(x_i); \\ x_1 &< x_{n+1}. \end{aligned} \tag{3}$$

Кроме того, переменные $x_1, x_{n+1}, y_2, \dots, y_n$ ограничены размерами исследуемой области.

При задании поверхности скольжения полиномом второй степени $g(x) = ax^2 + bx + c$ в качестве первых двух варьируемых параметров выступают абсциссы точек пересечения линий $f(x)$ и $g(x)$ x_1 и x_2 , а также ордината $y_c = g\left(\frac{x_1+x_2}{2}\right)$ (рис. 2). При этом должны выполняться ограничения:

$$y_c < f\left(\frac{x_1 + x_2}{2}\right);$$

$$x_1 < x_2.$$
(4)

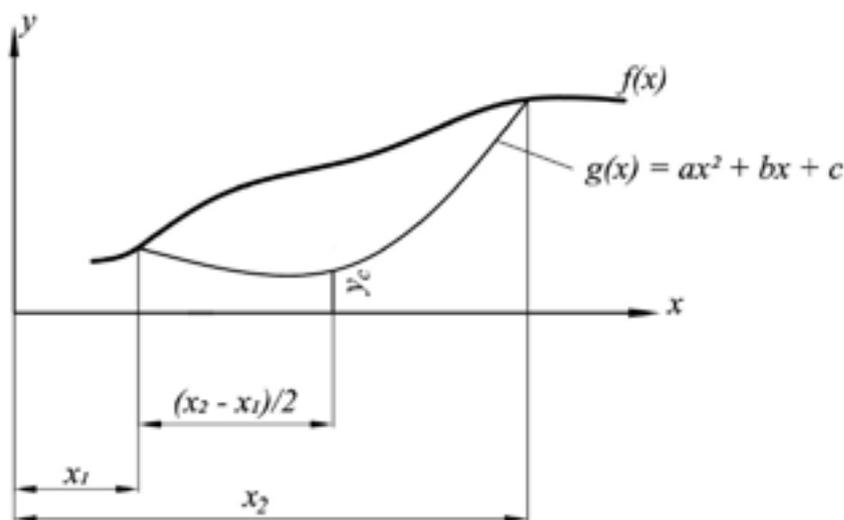


Рис. 2. К определению коэффициента устойчивости при задании поверхности скольжения полиномом второй степени /

Fig. 2. On the determination of the stability coefficient when the sliding surface is specified by a polynomial of the second degree

В случае использования для поверхности скольжения полинома третьей степени $a(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$ (рис. 3) варьируемыми параметрами выступают абсциссы x_1 и x_2 , а также ординаты $y_{1/3}$ и $y_{2/3}$, определяемые как:

$$y_{1/3} = g\left(x_1 + \frac{x_2 - x_1}{3}\right) < f\left(x_1 + \frac{x_2 - x_1}{3}\right);$$

$$y_{2/3} = g\left(x_1 + \frac{2}{3}(x_2 - x_1)\right) < f\left(x_1 + \frac{2}{3}(x_2 - x_1)\right).$$
(5)

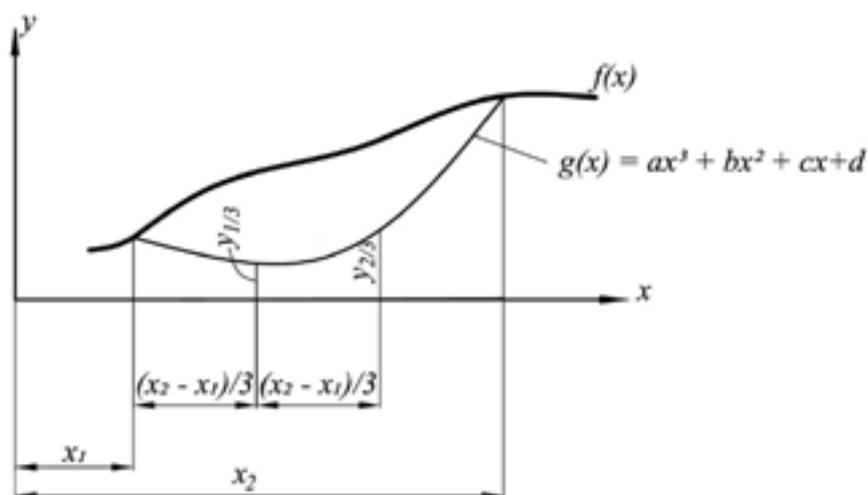


Рис. 3. К определению коэффициента устойчивости при задании поверхности скольжения полиномом третьей степени /

Fig. 3. To the determination of the stability coefficient when the sliding surface is specified by a polynomial of the third degree

Поиск минимума целевой функции K_y нами реализован в среде MATLAB при помощи пакетов OptimizationToolbox и GlobalOptimizationToolbox. Используется метод внутренней точки – градиентный метод, позволяющий найти локальный минимум функции [Byrd et al., 1999], а также метод шаблонного поиска – метод безградиентной оптимизации, который позволяет найти глобальный минимум [Findler et al., 1987].

Результаты работы и их обсуждение

Для апробации разработанной методики был выполнен расчет склона, схема которого приведена на рисунке 4. Склон принимался однородным, с удельным весом $\gamma = 18 \text{ кН/м}^3$, сцеплением $c = 35 \text{ кПа}$ и углом внутреннего трения $\varphi = 22^\circ$.

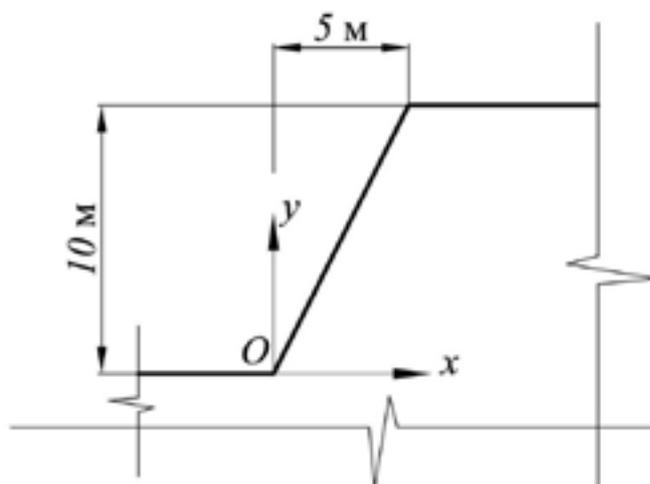


Рис. 4. Схема рассчитываемого склона /
Fig. 4. Scheme of the calculated slope

В таблице 1 представлены принятые нами нижние (lb) и верхние (ub) границы варьируемых параметров при поиске поверхности скольжения в виде кусочно-линейной функции.

Таблица 1 / Table 1

Нижние и верхние границы входных параметров целевой функции / Lower and upper bounds of the input parameters of the objective function

Параметр / Parameter	lb	ub
$x_1, \text{ м}$	-1	5
$x_{n+1}, \text{ м}$	0	20
$y_2 \dots y_n, \text{ м}$	-1	10

На рисунке 5 приведены поверхности скольжения в виде кусочно-линейной функции, полученные при различном числе отрезков n . Отметим, что при использовании метода внутренней точки и метода шаблонного поиска заметной разницы в результатах не было выявлено. Значения коэффициента устойчивости при различных n сведены в таблицу 2.

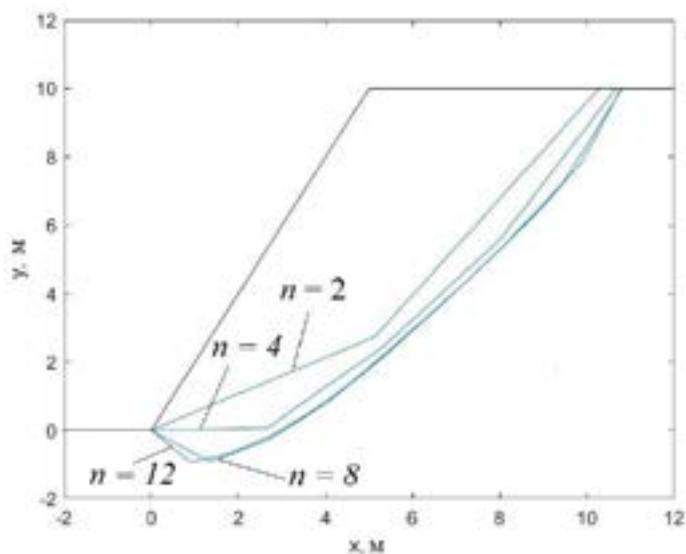


Рис. 5. Поверхности скольжения в виде кусочно-линейной функции при различном числе отрезков n /
Fig. 5. Slip surfaces in the form of a piecewise linear function for a different number of segments n

Таблица 2 / Table 2

**Значения коэффициента устойчивости при различном числе отрезков n /
The values of the stability coefficient for a different number of segments n**

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
K_v	1,96	1,64	1,54	1,5	1,47	1,45	1,44	1,41	1,41	1,40	1,40	1,40

Из таблицы 2 и рисунка 5 видна сходимость решения при увеличении числа отрезков. Также для контроля достоверности результатов полученные при $n = 10$ координаты точек поверхности скольжения передавались в программный комплекс GeoStab. Данный комплекс не позволяет найти поверхность скольжения в виде ломаной линии, но может по заданной линии рассчитать коэффициент устойчивости. В результате было получено значение коэффициента устойчивости $K_v = 1.4$ (рис. 6), что совпадает с авторским решением.

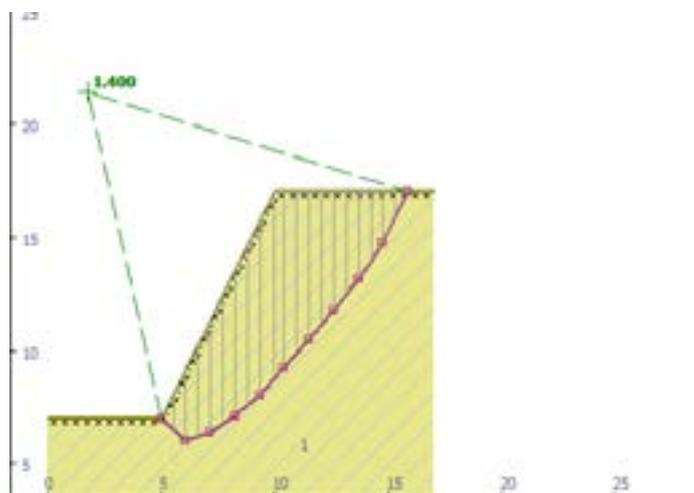


Рис. 6. Результаты определения коэффициента устойчивости в GeoStab при $n=10$ /
Fig. 6. The results of determining the stability coefficient in GeoStab at $n=10$

На рисунке 7 показаны поверхности скольжения, полученные при использовании полинома второй и третьей степени. Принятые при этом нижние и верхние границы варьируемых параметров приведены в таблице 3. В случае использования полинома второй степени коэффициент устойчивости составил 1,48, а при использовании полинома третьей степени – 1,44. Также на данном графике приведено решение с использованием кусочно-линейной функции при $n = 12$. Интересно, что данное решение занимает промежуточное положение между решениями с использованием полиномов 2-й и 3-й степени.

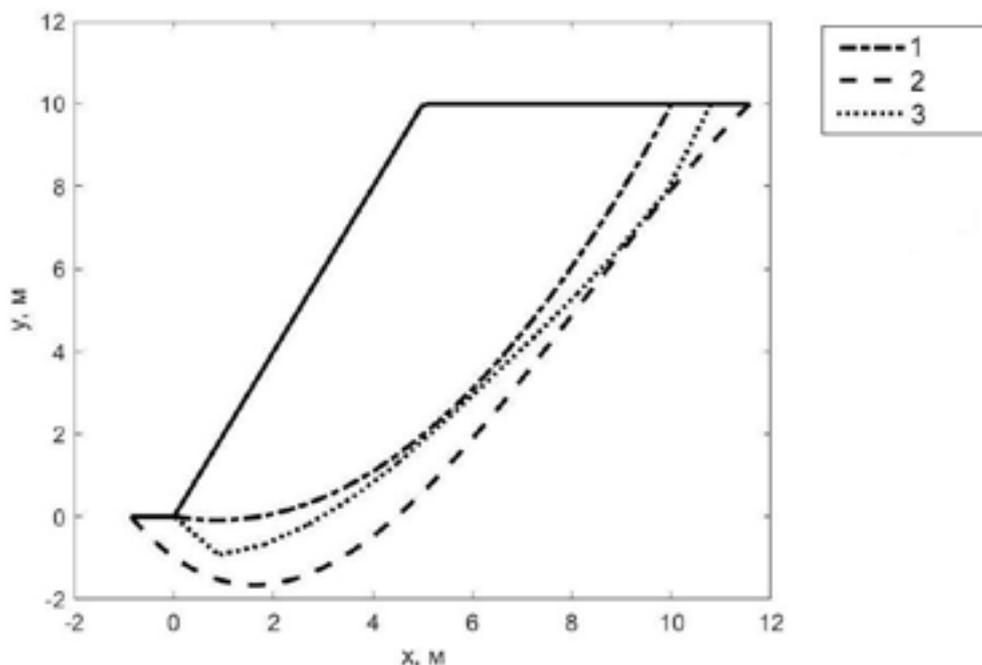


Рис. 7. Поверхности скольжения в виде полиномов второй степени (1) и третьей степени (2), а также кусочно-линейной функции при $n = 12$ (3) /

Fig. 7. Slip surfaces in the form of polynomials of the second degree (1) and third degree (2), as well as a piecewiselinear function for $n = 12$ (3)

Таблица 3 / Table 3

Нижние и верхние границы входных параметров целевой функции при использовании полиномов второй и третьей степени / Lower and upper bounds of the input parameters of the objective function when using polynomials of the second and third degree

Параметр / Parameter	lb	ub
$x_1, \text{ м}$	-2	5
$x_2, \text{ м}$	0	20
$y_c, y_{1/3}, y_{2/3}, \text{ м}$	-10	10

Представляет интерес сравнение полученных решений с результатами на основе альтернативных методов. В качестве таких методов нами использовались метод круглоцилиндрических поверхностей, а также метод конечных элементов с после-

довательным понижением прочностных характеристик грунта (с-phi-reduction). При определении коэффициента устойчивости методом круглоцилиндрических поверхностей использовался программный комплекс GeoStab, в который заложены основные известные варианты данного метода, включая метод Феллениуса, Бишопа, Шахунянца, касательных сил, Янбу, Спенсера, Моргенштерна-Прайса. Для расчета методом конечных элементов нами использовался программный комплекс Plaxis. Результаты расчета склона в GeoStab по методу круглоцилиндрических поверхностей сведены в таблицу 4.

Таблица 4 / Table 4

Коэффициенты устойчивости, полученные по методу круглоцилиндрических поверхностей / Stability coefficient obtained by the method of round cylindrical surfaces

Метод / Method	Феллениуса / Fellenius	Бишопа / Bishop	Шахунянца / Shahunyants	Касательных сил / Tangential Forces	Янбу / Yanbu	Спенсера / Spencer	Моргенштерна-Прайса / Morgenstern-Price
K_{φ}	1,562	1,612	1,601	1,562	1,645	1,700	1,909

Из таблицы 4 видно, что для всех рассмотренных методов, в том числе и метода касательных сил, при выборе в качестве линии скольжения дуги окружности коэффициент устойчивости оказался выше, чем в случае использования в качестве линии скольжения кусочно-линейной функции и полиномов. Меньший коэффициент устойчивости говорит о более вероятной реализации разрушения по схемам, приведенным на рисунке 7.

Близкий к нашему решению результат $K_{\varphi} = 1,42$ был получен в программном комплексе Plaxis. Однако поверхность скольжения в Plaxis ближе к круглоцилиндрической (рис. 8).

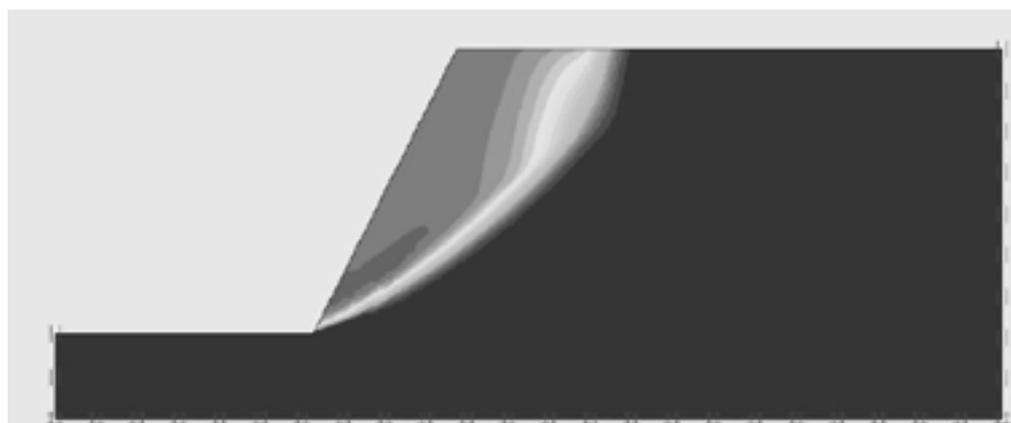


Рис. 8. Изополя полных перемещений грунта в Plaxis /
Fig. 8. Isofields of total soil displacements in Plaxis

Имеющиеся расхождения в результатах, полученных различными методами, говорят о необходимости проведения дальнейших исследований по данному вопросу, в том числе экспериментальных. Нашей дальнейшей целью будет создание мелко-масштабных моделей оползневых склонов и сравнение результатов их испытаний с теоретическими расчетами.

Выводы

Разработана методика поиска поверхностей скольжения оползневого тела в виде кусочно-линейной функции, а также полиномов второй и третьей степени при помощи методов нелинейной оптимизации. Показана сходимость метода при увеличении числа отрезков в случае использования кусочно-линейной функции. Выполнено сравнение с расчетом по методу круглоцилиндрических поверхностей, которое показало, что поверхность скольжения в виде кусочно-линейной функции характеризуется меньшим коэффициентом устойчивости по сравнению с поверхностью в виде кругового цилиндра. Это говорит о более вероятном образовании оползневого тела по схеме, близкой к полученной нами ломаной линии.

Литература

1. Будников А.А. Обзор методов расчета устойчивости склонов и особенность их применения для определения параметров устойчивого откоса. // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня рождения академика К.И. Сагпаева, 120-летию со дня рождения профессора К.В. Радугина, Томск, 8-12 апреля 2019 г. Т. 1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2019. – С. 330-331.
2. Бартоломей И.Л., Карпушко М.О., Карпушко Е.Н. Расчет устойчивости склона под канатную дорогу. // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2020. – №1. – С. 37–44.
3. Батьянова Н.Л. Прогноз устойчивости склонов Почаинского оврага в Нижнем Новгороде для строительного освоения. // Геоэкология, инженерная геодинамика, геологическая безопасность. Печеркинские чтения. – 2020. – С. 179–191.
4. Васин Д.В., Лехов М.В. Разгрузка грунтовых вод в долину р. Москвы и ее влияние на устойчивость склона Карамышевской набережной. // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. – 2021. – С. 722–738.
5. Гайджуров П.П., Савельева Н.А., Дьяченко В.А. Конечно-элементное моделирование совместной работы оползня скольжения и защитного сооружения. // Advanced Engineering Research. – 2021a. – Т. 21. №2. – С. 133–142.
6. Гайджуров П.П., Савельева Н.А., Труфанова Е.В. Численное моделирование поведения кинематически нестабильных склонов при динамических воздействиях. // Advanced Engineering Research. – 2021. – Т. 21. №4. – С. 300–307.
7. Зеркаль О. Оползни скольжения и оползни сдвига: особенности развития и типизация // Инженерная геология. – 2021. – Т. 16. №1. – С. 38–59.
8. Ислямова А.А., Хорошилов В.С. Моделирование перемещений оползневых склонов по материалам геодезических наблюдений и инженерно-геологических изысканий. // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2021. – Т. 26. №2. – С. 5–17.
9. Свалова, В.Б. Управление геоэкологическим риском и проблемы устойчивого развития горных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №1. – С. 129–145. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010
10. Яицкая Н. А., Бригида В. С. Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №1. – С. 162–173. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012
11. Byrd R.H., Hribar M.E., Nocedal J. An interior point algorithm for large-scale nonlinear programming. // SIAM Journal on Optimization. – 1999. – Vol. 9. No.4. – pp. 877–900.
12. Cala M., Flisiak J. Slope stability analysis with FLAC and limit equilibrium methods. // FLAC and numerical modeling in geomechanics. – CRC Press, 2020. – pp. 111–114.

13. Cecilio D.L., Garcia G.F.N. A comparative study of strength reduction and gravity increase methods considering random fields in slope stability analysis. // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2022. – Vol. 44. No.11. – p. 539.
14. Dyson A. P., Tolooiyan A. Optimisation of strength reduction finite element method codes for slope stability analysis. // *Innovative Infrastructure Solutions*. – 2018. – Vol. 3. No.1. – p. 38.
15. Fattahi H., Zandyilghani N. Slope stability analysis using Bayesian Markov chain Monte Carlo method. // *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2020. – Vol. 38. – pp. 2609-2618.
16. Findler N.V., Lo C., Lo R. Pattern search for optimization. // *Mathematics and computers in simulation*. – 1987. – Vol. 29. No.1. – pp. 41-50.
17. Harabinova S., Kotrasova K., Kormanikova E., Hegedusova I. et al. Analysis of Slope Stability. // *Civil and Environmental Engineering*. – 2021. – Vol. 17. No.1. – pp. 192-199.
18. Kumar N., Verma A., Sardana S., Sarkar K. Comparative analysis of limit equilibrium and numerical methods for prediction of a landslide. // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2018. – Vol. 77. – pp. 595-608.
19. Liu X., Wang Y., Li D. Q. Investigation of slope failure mode evolution during large deformation in spatially variable soils by random limit equilibrium and material point methods. // *Computers and Geotechnics*. – 2019. – Vol. 111. – pp. 301-312.
20. Rotaru A., Bejan F., Almohamad D. Sustainable Slope Stability Analysis: A Critical Study on Methods. // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14. No.14. – pp. 8847.
21. Salunkhe D.P., Chvan G., Bartakke R.N., Kothavale P.R. An overview on methods for slope stability analysis. // *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. – 2017. – Vol. 6. No.03. – pp. 2278-0181.
22. Sharma A. et al. Slope stability analysis of steep-reinforced soil slopes using finite element method. // *Geotechnical Applications: IGC 2016*. Vol. 4. – Springer Singapore. – 2019. – pp. 163-171.
23. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Mel'kov D.A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of northern Caucasus. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014a. – Vol. 50(2). – pp. 263–272.
24. Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014b. – Vol. 50(5). – pp. 707–718.
25. Zaalishvili V., Mel'kov D., Kanukov A., Dzeranov B. Spectral-temporal features of seismic loadings on the basis of strong motion wavelet database. // *International Journal of GEOMATE*. – 2016. – Vol. 10(1). – pp. 1656–1661.

References

1. Budnikov A.A. Review of methods for calculating the stability of slopes and features of their application to determine the parameters of a stable slope. In: *Proc. of the XXIII Int. Symp. named after Acad. M.A. Usov*. Tomsk, April 8-12, 2019. Vol. 1. Tomsk. TPU. 2019. pp. 330–331. (In Russ.)
2. Bartolomey I.L., Karpushko M.O., Karpushko E.N. Calculation of the stability of the slope for the cable car. *Transport. Transport facilities. Ecology*. 2020. No. 1. pp. 37–44. (In Russ.)
3. Batyanova N.L. Forecast of the slopes stability of the Pochainsky ravine in Nizhny Novgorod for construction development. *Geocology, engineering geodynamics, geological safety. Pecherinsk readings*. 2020. pp. 179–191. (In Russ.)
4. Vasin D.V., Lekhov M.V. Discharge of groundwater into the valley of the river Moscow and its influence on the stability of the slope of the Karamyshevskaya embankment. *Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation*. 2021. pp. 722–738. (In Russ.)
5. Gaidzhurov P.P., Savelyeva N.A., Dyachenkov V.A. Finite element modeling of joint operation of a sliding landslide and a protective structure. *Advanced Engineering Research*. 2021a. Vol. 21. No. 2. pp. 133–142. (In Russ.)

6. Gaidzhurov P.P., Savelyeva N.A., Trufanova E.V. Numerical simulation of the behavior of kinematically unstable slopes under dynamic influences. *Advanced Engineering Research*. 2021b. Vol. 21. No. 4. pp. 300–307. (In Russ.)
7. Zerkal O. Slip and shear landslides: features of development and typification. *Engineering Geology*. 2021. Vol. 16. No. 1. pp. 38–59. (In Russ.)
8. Islyamova A.A., Khoroshilov V.S. Modeling of displacements of landslide slopes based on the materials of geodetic observations and engineering-geological surveys. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*. 2021. Vol. 26. No. 2. pp. 5–17. (In Russ.)
9. Svalova V.B. Geoecological risk management and problems of sustainable development of mountain territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No.1. pp. 129–145. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010 (in Russ.)
10. Yaitskaya N.A., Brigida V.S. Geoinformation technologies in solving three-dimensional geoecological problems. Spatial data interpolation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No.1. pp. 162–173. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012 (in Russ.)
11. Byrd R.H., Hribar M.E., Nocedal J. An interior point algorithm for large-scale nonlinear programming. *SIAM Journal on Optimization*. 1999. Vol. 9. No.4. pp. 877–900.
12. Cala M., Flisiak J. Slope stability analysis with FLAC and limit equilibrium methods. *FLAC and numerical modeling in geomechanics*. CRC Press, 2020. pp. 111–114.
13. Cecilio D.L., Garcia G.F.N. A comparative study of strength reduction and gravity increase methods considering random fields in slope stability analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2022. Vol. 44. No.11. p. 539.
14. Dyson A. P., Tolooiyan A. Optimisation of strength reduction finite element method codes for slope stability analysis. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2018. Vol. 3. No.1. p. 38.
15. Fattahi H., Zandyilghani N. Slope stability analysis using Bayesian Markov chain Monte Carlo method. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2020. Vol. 38. pp. 2609–2618.
16. Findler N.V., Lo C., Lo R. Pattern search for optimization. *Mathematics and computers in simulation*. 1987. Vol. 29. No.1. pp. 41–50.
17. Harabinova S., Kotrasova K., Kormanikova E., Hegedusova I. et al. Analysis of Slope Stability. *Civil and Environmental Engineering*. 2021. Vol. 17. No.1. pp. 192–199.
18. Kumar N., Verma A., Sardana S., Sarkar K. Comparative analysis of limit equilibrium and numerical methods for prediction of a landslide. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2018. Vol. 77. pp. 595–608.
19. Liu X., Wang Y., Li D. Q. Investigation of slope failure mode evolution during large deformation in spatially variable soils by random limit equilibrium and material point methods. *Computers and Geotechnics*. 2019. Vol. 111. pp. 301–312.
20. Rotaru A., Bejan F., Almohamad D. Sustainable Slope Stability Analysis: A Critical Study on Methods. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. No.14. pp. 8847.
21. Salunkhe D.P., Chvan G., Bartakke R.N., Kothavale P.R. An overview on methods for slope stability analysis. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2017. Vol. 6. No. 03. pp. 2278–0181.
22. Sharma A. et al. Slope stability analysis of steep-reinforced soil slopes using finite element method. *Geotechnical Applications: IGC 2016*. Vol. 4. Springer Singapore. 2019. pp. 163–171.
23. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Mel'kov D.A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of northern Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014a. Vol. 50(2). pp. 263–272.
24. Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014b. Vol. 50(5). pp. 707–718.
25. Zaalishvili V., Mel'kov D., Kanukov A., Dzeranov B. Spectral-temporal features of seismic loadings on the basis of strong motion wavelet database. *International Journal of GEOMATE*. 2016. Vol. 10(1). pp. 1656–1661.

УДК 504.064.36: 504.064.37

DOI: [10.46698/VNC.2023.61.18.012](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.61.18.012)

Original papers

Analysis of earthquake prediction models to obtain the best model

M.G. Pkhovelishvili¹, N.N. Archvadze², M.M. Nikoleishvili¹

¹Muskhelishvili Institute of Computational Mathematics, Georgian Technical University,
4 G. Peradze Str., 0159 Tbilisi, Georgia, e-mail: merab5@list.ru;

²Faculty of Exact and Natural Sciences, I. Javakhishvili Tbilisi State University,
1 I. Chavchavadze, Tbilisi 0179, Georgia, e-mail: natela.archvadze@tsu.ge

Received: 09.01.2023, revised: 10.02.2023, accepted: 17.02.2023

Abstract. Relevance. The science of studying the causes of earthquakes is rapidly developing. Each cause of an earthquake can be considered a precursor of an earthquake and using these precursors, predictive models can be built. To date, there are quite a few earthquake prediction models, which allow you to analyze these models to improve accuracy, that is, apply forecast data with higher probabilities. **Aim.** Analyze forecasting models and, based on the substantiation of existing forecasts, classify them into “necessary” and “sufficient” models, and define these terms. And also, to determine the algorithms for planning further actions to obtain much better forecasting models. It is “necessary” to develop algorithms that bring the “necessary” model to the “sufficient” one and vice versa. “necessary” forecasting models are models whose set of forecasts always includes a set of actually occurring events, and “sufficient” forecasting models are models whose forecasts always come true. **The research methodology** is to process the existing large data structures that are specified for further use in our algorithm. To calculate the probability of forecast accuracy, an algorithm with “parallel data” – “parallel probability” is used, which allows you to select those pairs of forecasting models (or triples, quadruples, etc.), whose “joint” probability of forecast accuracy gives a much better result than separately. **Results** were the formation of an author’s approach to processing earthquake forecast models and obtaining a generalized model that gives forecasts with a higher probability due to the use of statistics from already existing forecast models and their further observation. Algorithms have been defined for a) when to analyze all available required models and obtain one best model by combining the appropriate number of required models and b) when to combine enough models closest to guessing all predictions so that their number is less than in other unions. Also exists an algorithm that determines the study to be carried out after the occurrence of each event – the calculation of the probability of justification for individual models, as well as paired and triple models. The problem of using these algorithms in a specific area – earthquake prediction is discussed, and the results of the work of the author’s algorithm are shown.

Keywords: predictive models, necessary and sufficient models, earthquake prediction.

For citation: Pkhovelishvili M.G., Archvadze N.N., Nikoleishvili M.M. Analysis of earthquake prediction models to obtain the best model. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. 13(1): 162-172. DOI: 10.46698/VNC.2023.61.18.012.

DOI: [10.46698/VNC.2023.61.18.012](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.61.18.012)

Оригинальная статья

Анализ моделей прогнозирования землетрясений для получения наилучшей модели

М.Г. Пховелишвили ¹, Н.Н. Арчвадзе ², М.М. Николеишвили ¹

¹Институт вычислительной математики им. М. Мухелишвили Грузинского технического университета, Грузия, г. Тбилиси, 0159, ул. Г. Перадзе, 4, e-mail: merab5@list.ru;

²Тбилисский государственный университет им. И. Джавахишвили, Грузия, 0179, г. Тбилиси, пр. И. Чавчавадзе 1, e-mail: natela.archvadze@tsu.ge

Статья поступила: 09.01.2023, доработана: 10.02.2023, одобрена в печать: 17.02.2023

Резюме: Актуальность работы. Наука, изучающая причины землетрясений, стремительно развивается. Каждую причину землетрясения можно рассматривать как предвестник землетрясения, и, используя эти предвестники, построить модели прогнозирования. На сегодняшний день существует довольно много моделей прогнозирования землетрясений, что позволяет анализировать эти модели для повышения точности, то есть применять данные прогноза с более высокими вероятностями. **Целью работы** является анализ моделей прогнозирования, их классификация на основе существующих прогнозов на «необходимые» и «достаточные» модели, дать определение этим понятиям. Также целью является определение алгоритмов планирования дальнейших действий для получения гораздо более качественных моделей прогнозирования. Необходимо разработать алгоритмы, приводящие «необходимую» модель к «достаточной» и наоборот. «Необходимые» модели прогнозирования – это модели, набор прогнозов которых всегда включает набор реально происходящих событий, а «достаточные» модели прогнозирования – это модели, прогнозы которых всегда сбываются. **Метод исследования** заключается в обработке имеющихся больших структур данных, которые заданы для дальнейшего использования в нашем алгоритме. Для расчета вероятности точности прогноза используется алгоритм с «параллельными данными» – «параллельная вероятность», который позволяет выбрать те пары моделей прогнозирования (или тройки, четверки и т.д.), «совместная» вероятность точности прогноза которых дает гораздо лучший результат, чем по отдельности. **Результатами исследования** стали формирование авторского подхода к обработке моделей прогноза землетрясений и получение обобщенной модели, дающей прогнозы с большей вероятностью за счет применения статистики уже существующих моделей прогноза и их дальнейшего наблюдения. Алгоритмы были определены для вариантов: а) анализа всех имеющихся необходимых моделей и получения одной лучшей модели путем объединения соответствующего количества необходимых моделей, б) объединения достаточного количества моделей, наиболее близких к оцениванию всех прогнозов, чтобы их количество было меньше, чем в других объединениях. Также существует алгоритм, определяющий исследование, которое необходимо провести после наступления каждого события – расчет вероятности обоснования для отдельных моделей, а также парных и тройных моделей. Обсуждается задача использования этих алгоритмов в конкретной области – прогнозирование землетрясений и показаны результаты работы авторского алгоритма.

Ключевые слова: прогностические модели, необходимые и достаточные модели, прогноз землетрясений.

Для цитирования: Пховелишвили М.Г., Арчвадзе Н.Н., Николеишвили М.М. Анализ моделей прогнозирования землетрясений для получения наилучшей модели. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(1): 162-172. DOI: 10.46698/VNC.2023.61.18.012.

Introduction

The scope of predictive modeling is vast and includes the tasks of predicting natural phenomena: earthquakes, landslides, tsunamis, floods, etc., as well as the tasks of predicting the economy (business, macroeconomics), political events (elections, distribution of political power), medicine and other fields.

Geoinformatics: A scientific and technical direction that combines both the theory of modeling a subject area using spatial data and technologies for creating and using geographic information systems [Ivannikov et al., 2001]. As you know, the main tasks of geoinformatics:

1. Creation of geodatabases (geocoding) and their management;
2. Analysis and modeling of geodata;
3. Software development for the first two tasks [Khokhryakova, 2001].

In this article, we will outline the modeling task and create algorithms to improve the modeling process, which makes this task relevant.

Science is rapidly developing to study the causes of earthquakes. Of particular note are [Guglielmi et al., 2022; Zavyalov, Zotov, 2021; Kachakhidze et al., 2015; Kereselidze et al., 2012] where both the main causes of earthquakes and the earthquake prediction models built on their basis are discussed. Scientists do temporal and Spatial Geophysical Data Analysis for the Issues of Natural Hazards and Risk Assessment [Matcharashvili et al., 2015; Melkov et al., 2022]. Scientists study correlation between the value of macroseismic intensity and the indicators of instrumental records [Chelidze et al., 2019; Zaalishvili et al., 2014a, b, 2016, 2022] and also process some new data on the influence of various soil conditions on probabilistic seismic hazard assessment of territories [Chernov et al., 2022]. In the course of the study, the works of a number of authors were studied: [Yaitskaya, Brigida, 2022; Kerimov, Ezirbaev, 2022; Lipilin, Evtushenko, 2022; Tsiramua et al., 2009; Matcharashvili et al., 2016; Basheleishvili et al., 2019], who solve various problems of geoinformatics, including the problem of modeling.

Methodology

To solve the tasks set, a complex research method was used, which consisted in assessment of the probability of success. The research methodology is to process the existing large data structures that are specified for further use in our algorithm [Gasitashvili et al., 2019, 2021; Phkhovelishvili et al., 2019]. To calculate the probability of forecast accuracy, an algorithm with “parallel data” – “parallel probability” [Gasitashvili et al., 2019] is used, which allows you to select those pairs of forecasting models (or triples, quadruples, etc.), whose “joint” probability of forecast accuracy gives much better result than individually.

Earthquake prediction models have been studied by the authors of this article and their co-authors, and some results have been obtained, which are presented in various papers [Gasitashvili et al., 2019, 2021; Phkhovelishvili et al., 2019].

Based on the substantiation of existing forecasts, the article considers their division into “necessary” and “sufficient” models. About the best couples, trios, etc. the discussion will go on. Selection algorithms that will make it much easier for less developed countries to make better forecasts. Because in such countries it is impossible to have the appropriate equipment for a large number of models and observe them. With our current algorithm, fewer models can be used to get more probabilistic predictions.

The results of the work and their discussion

Each cause can be considered a precursor of an earthquake and based on these precursors, predictive models can be built. To date, there are quite a few earthquake prediction models, which makes it possible to analyze them, which determines the relevance of the topic under discussion.

For predictive modeling, definitions of the concepts of “necessary” and “sufficient” models are introduced.

Definition: “necessary” predictive models are those models whose set of predictions always includes a set of actually occurred events. Obviously, such models often give incorrect predictions, but they predict every event that occurs.

Definition: “sufficient” predictive models are models whose predictions are always correct, even though they cannot predict all events that occur.

If “sufficient” models predict that a particular event will occur, that event will definitely occur. However, other events were not predicted by “sufficient” models. In practice, there may be too few such models (for example, in earthquake prediction) or too many of them (for example, in economics).

A. Necessary predictive models

Suppose there are models A_1, A_2, \dots, A_n for predicting a particular event. Each of these models is necessary, which means that the event in question has the necessary antecedents for which these models are developed. n is the number of antecedents under consideration. These models do not consider models that take into account unnecessary antecedents, which is why they could not predict the occurred event. As demonstrated [Prangishvili et al., 2022], the necessary predictive modeling requires the calculation of “true prediction probabilities”.

The true prediction probability of the model A_i is the ratio of the number of occurrences of an event to the number of occurrences of an event predicted by the antecedent of this model, expressed as a percentage, i.e. the probability of the A_i model’s true prediction K_i is equal to:

$$K_i = \frac{m}{P_i} 100\%,$$

Where m – is the number of events that occurred, and P_i – is the number of occurrences of the event according to the A_i model, which was based on a_i antecedent.

For cases where we have a large number of necessary predictive models, we may arrange them according to the prediction time. In the beginning, we put the model that predicts the earliest (M_1), etc., and the last model predicts an event (M_n) before the occurrence of (t_v) event. Fig. 1 illustrates such distributed models that allow for the possibility of the timely response of the corresponding services. These are predictions that allow to management the relevant institutions and organizations.

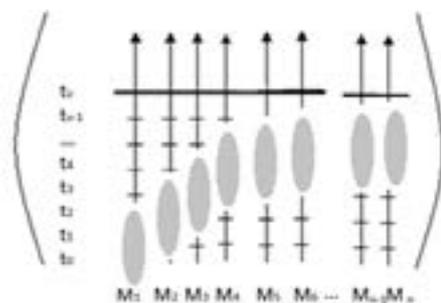


Fig. 1. Predictive models ordered by time

We discussed combinations of models (two, three, etc.) and estimated the probability of their combined correct prediction. Estimation and selection of combinations are made according to the definition of “parallel probabilities” [Gasitashvili et al., 2019]. It has been proven that when predicting events, if pairs of models are selected for which the number of “coincidences” of incorrect predictions of a given event is the smallest, but the presence of correct predictions for each of them is a necessary condition, then the true prediction probability calculated for such a best pair is always greater than or equal to the true prediction probability of the best model among all models (Fig. 2).

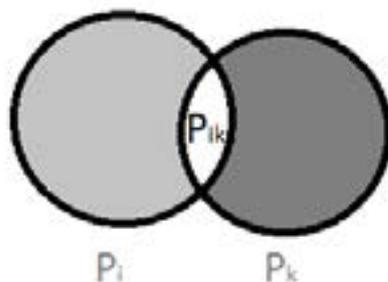


Fig. 2. Graphical illustration of two-model set case in an Euler-Venn diagram

This is an interesting metamorphosis – one may find a couple of models that individually often give incorrect predictions, but the intersection of their predictions gives the best results.

In addition, in case of the necessary models, it demonstrates that the more predictive model intersections we take, the better the prediction. For example, the best three – a combination of three predictions (Fig. 3) gives better results than the best pair of predictions (two), the best four give better results than the best three, etc. Thus, it makes sense to discuss the necessary sets of models.

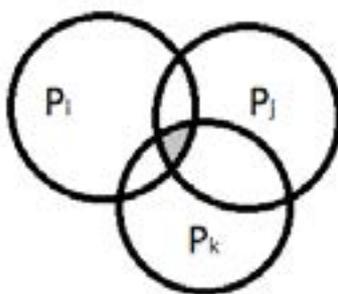


Fig. 3. Graphical representation of three-model set case in an Euler-Venn diagram

In necessary modeling, we do not consider unnecessary models, although the Bayesian approach does not make such a distinction [Stoltz et al., 2021]. On the contrary, all existing models are used to answer the question of whether a given event will occur or not. Depending on the predominance in terms of quantity or other characteristics (yes or no), an answer is given to the question of whether this or that event will occur at a given time.

B. Sufficient predictive models

In practice, when there are very few sufficient models and there is no single universal model that predicts all events, the question arises whether these sufficient models can be

used in such a way that their combination predicts all events, that is Necessary predictive models, that is, the combination of models become sufficient.

For example, let us consider the history of a predictable event that has occurred n times over a period of time, such as one year or ten years. Suppose one of the predictive models predicts that a certain event will occur k times, the second – p times, and the third – q – times. If $k < n$ or $p < n$ or $q < n$, then this means that none of the models individually will be sufficient, but if we consider a combination of all three models, then together they may predict n number of events. It follows that having considered a combination of these three models in combination, we may get a sufficient model (see Fig. 4):

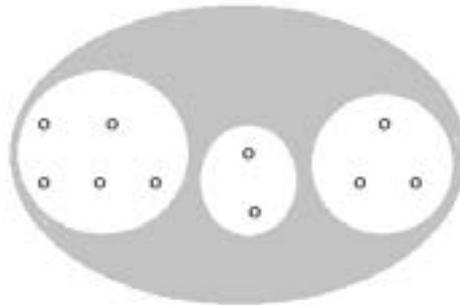


Fig. 4. A sufficient model built by combining three models

The figure considers three models. One predicted the event five times, the second model – 2 times (different from the first), and the third model – 3 times. Jointly, the three models predicted ten events, that is, exactly as many events as occurred, which means that their combination can be considered a “sufficient” model.

Algorithm for selecting pairs of the best models: when we considered the necessary models, then we should consider the intersection of the forecasts of these models as pairs of models, and in the set of sufficient models, we consider it necessary to consider their combination (not the intersection) and those models should be selected that, as far as possible, fully cover all possible events in the set. For example, if there were seven earthquakes, and one model predicted 3 of them, another predicted two others, and the third predicted two more, then together, that is the combination of all three models predicted all seven earthquakes.

Such models are “sufficient”, that is, they do not make predictions that do not come true. The “necessary” models are not “sufficient”, but the combination of these “sufficient” ones results in the “necessary” model, that is, we completely cover the set of all events that have occurred, so in this case, we are trying to get the most complete prediction of all occurred events. It may not be 100%, but in the end, after combining a “sufficient” number of models, it will be close to 100%, and also, obviously, here we combine antecedents and narrow down identical, repeating antecedents to a single antecedent. Here too we can consider which antecedent results from which of these antecedents.

The main objective is to bring the probability of guessing such a combination as close as possible to 100%. For example, if the probability of guessing is 90%, that means that combining enough models will cover 90% of the events, which will be a very good result.

The question is when the best models should be obtained from the “necessary” models and also when the best combination of best models should be identified. Obviously, the algorithm that was created first will analyze all existing models and existing data and obtain the appropriate number of required models, the intersection of which gives the best

result. Also, from these models, a combination of “sufficient” models is obtained, which will be closest to the correctness of all forecasts, while their number is less compared to other combinations.

Model classification update algorithm for “necessary” models: Obviously, after each event, it may turn out that we already have new models, or some of the old “necessary” models may turn out to be un “necessary”, which means that they could not predict the event that has occurred, in which case such models are discarded, and we will need to look for new pairs.

Model classification update algorithm for “sufficient” models: As for “sufficient” models, after each event, it may turn out that some “sufficient” models from the penultimate to the last event gave an incorrect prediction. In this case, such “sufficient” models are also discarded, and if a new “sufficient” model is introduced, then it is also processed to identify new and old “sufficient” models that cover events as fully as possible.

C. The example

To demonstrate the presented algorithms, consider a concrete example of earthquake prediction. Table 1 shows the latest earthquakes in or near Tbilisi City, Georgia, in the past 30 days (20.12.2022-20.01.2023), whose magnitude is from 3 to 5 [<https://www.volcanodiscovery.com/place/7999/earthquakes/tbilisi-past30days.html>]. We have taken earthquake magnitude, date of occurrence, time and name of the epicenter as characteristics of each earthquake. The table 1 contains a list of earthquakes in descending order of magnitude.

Table 1

Latest quakes in or near Tbilisi City, Georgia

No	Magnitude	Date	Time	Epicenter
1	4.5	Jan 14, 2023	11:36 am	Dagestan, Russia, 44 km north of Zaqatala, Azerbaijan
2	3.8	Jan 9, 2023	11:55 pm	48 km east of Kutaisi, Imereti, Georgia
3	3.7	Dec 26, 2022	2:47 pm	4.6 km north of Oni, Racha-Lechkhumi and Kvemo Svaneti, Georgia
4	3.3	Dec 28, 2022	10:15 pm	68 km south of Grozny, Chechen Republic, Russia
5	3.2	Dec 29, 2022 11:41 am	Dec 29, 2022 11:41 am	Azerbaijan, 89 km southeast of Tbilisi, K'alak'i T'bilisi, Georgia
6	3.0	Dec 30, 2022	12:00 am	43 km east of Telavi, Kakheti, Georgia

Let us review several models of earthquake prediction specifically for Tbilisi City. Designate the earthquake prediction models as Mod_1, Mod_2, \dots , etc. which provide some predictions through their predecessors (for example, for when it would occur, at which location and with which magnitude). We must choose only those models, which satisfy the necessary condition, i.e. intersection of the set of model predictions with the set of actual events should result in the set of actual events. We call this condition a “necessary” condition for choosing a prediction model. This condition in the case of earthquake means the following: If during the time T there occurred, for example, 6 earthquakes (as

in our example), only those models should be considered that predicted all these twelve earthquakes. Assume that such are the following models: $Mod_1, Mod_2, \dots, Mod_n$. In our case it is not essential, what specifically is each model and based on which predecessors of the earthquake it makes the prediction.

The numbers of predictions, the numbers of successful and failed predictions must be calculated for each model and calculated the probability of success for each model. It is obvious in this that the sum of successful and failed predictions is equal to the total number of predictions. As for the probability of success, it is calculated for each model and determines, how many times earthquake prediction was made and how many times an actual earthquake occurred. The following Table 2 shows the obtained results:

Table 2

Calculation of justification probabilities for individual models

Model	Number of predictions	Successful number of predictions	Failed number of predictions	Probability of success (%)
Mod_1	92	6	86	6,52
Mod_2	80	6	74	7,50
Mod_3	81	6	75	7,41
Mod_4	97	6	91	6,19
Mod_5	82	6	76	7,32

Assume that in total for 5 models there is calculated probability success and these values are: 6.52, 7.5, 7.41, 6.19, 7.32.

Author of each model of earthquake prediction claims that their model is best and argues that their model predicted each actually occurred earthquake. Neither of them provides number of wrong predictions, and, therefore, do not calculate success probability, which is quite low values. The success probability for a model might be low, but it is possible to find another model for this model, with which a combined possibility of success ensures the best result. We will show the correctness of this for our example.

We should consider pairs of models as a next step for the algorithm. In total there will be 10 pairs: M_1, M_2, \dots, M_{10} , where $M_1 = Mod_1 \cap Mod_2$; $M_2 = Mod_1 \cap Mod_3$; $M_3 = Mod_1 \cap Mod_4$; $M_4 = Mod_1 \cap Mod_5$; $M_5 = Mod_2 \cap Mod_3$; $M_6 = Mod_2 \cap Mod_4$; $M_7 = Mod_2 \cap Mod_5$; $M_8 = Mod_3 \cap Mod_4$; $M_9 = Mod_3 \cap Mod_5$; $M_{10} = Mod_4 \cap Mod_5$. For each model, we should calculate the numbers of predictions made, the numbers of successful and not successful predictions and, also, calculate the success possibilities for each pair. The following table calculates these values for pair models (Table 3):

Table 3

Calculation of justification probabilities for pairs models

Model	Number of predictions	Successful number of predictions	Failed number of predictions	Probability of success (%)
M_1	14	6	8	42,86
M_2	8	6	2	75,00
M_3	26	6	20	23,08

M_4	11	6	5	54,55
M_5	23	6	17	26,09
M_6	10	6	4	60,00
M_7	8	6	2	75,00
M_8	17	6	11	35,29
M_9	9	6	3	66,67
M_{10}	18	6	12	33,33

Let us analyze the obtained table by the corresponding diagram (see Fig. 5), where we see that the best result is obtained from M_2 – combination of two models Mod_1 and Mod_3 and M_7 – combination of two models Mod_2 and Mod_5 . The combined probability of success for them is increased up to 75%. Despite the fact that separately these models have significantly lower rates of success: 6.52% and 7.41%. For the considered examples, it is possible that two pairs of the models show the same result. In such a case, an expert should decide, which one of them should be used.

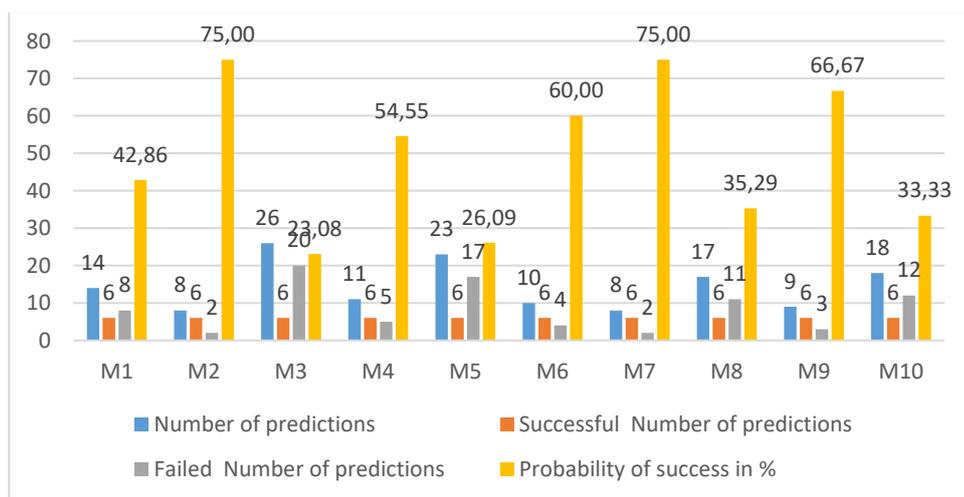


Fig. 5. The characteristics of the “necessary models” for pairs

Obviously, this applies not only to prediction of earthquakes, but to prediction of any other event, including static (most often these are problems of natural disaster prediction), and dynamic prediction, such as economic problems.

Summary

We have explained what necessary and sufficient models are. For the necessary models, an algorithm was proposed for choosing the intersection of two or more models, which in combination give a more probabilistic forecast. We have also discussed sufficient models and an algorithm for choosing sufficient models whose combination completely covers all occurred events. That is, there is also a need to combine such sufficient models. Thus, it is possible to obtain a sufficient or almost sufficient prediction model by intersecting the necessary models and by combining sufficient models to obtain the necessary or close to the necessary model.

In the algorithm proposed by us, unnecessary models are not taken into account when using the necessary models. If there are models that cannot predict the event (but are not sufficient models either), then such models are discarded from our database. Similarly, when considering sufficient models, where an excess forecast of an event is given, such a model can be excluded from the database of sufficient models.

Thus, we have explained what is necessary and sufficient models for predicting events, how to derive necessary models from sufficient ones, and determined how to derive sufficient models from necessary ones.

From sufficient models, we derive the necessary model, which will be both sufficient and necessary at the same time. In addition, we combine such sufficient models to obtain the necessary model.

References

1. Basheleishvili I., Bardavelidze A., Tsiramua S. The development of a model for decision support system of assessment and selection of university academic staff. *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*. 2019. Vol. 2(2). pp. 18-23.
2. Chelidze T., Melikadze G., Kobzev G., Shengelia I., Jorjiashvili N. Hydrodynamic and seismic response to teleseismic waves of strong remote earthquakes in Caucasus. *Acta Geophysica*. 2019. Vol. 67. pp. 1-16.
3. Chernov Y.K., Zaalishvili V.B., Chernov A.Y. Some new data on the influence of various soil conditions on probabilistic seismic hazard assessment of territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No.4. pp. 85–100. DOI: 10.46698/VNC.2022.32.20.007
4. Gasitashvili Z., Pkhovelishvili M., Archvadze N. Prediction of events means of data parallelism. *Proceedings – Mathematics and Computers in Science and Engineering, MACISE*. 2019. Vol. 8944725. pp. 32–35.
5. Gasitashvili Z., Pkhovelishvili M., Archvadze N. New algorithm for building effective model from prediction models using parallel data. *Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2021): Proceedings of the 15th International Conference, 21–24 Sept. 2021. Minsk, Belarus. – Minsk. UIIP NASB, 2021. pp. 25-28.*
6. Guglielmi A.V., Zotov O.D., Zavyalov A.D., Klain B.I. On the Fundamental Laws of Earthquake Physics. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2022. Vol. 16(2). pp. 143–149.
7. Ivannikov A.D., Kulagin V.P., Tikhonov A.N., Tsvetkov V.Ya. *Geoinformatics*. Moscow. MAKS Press, 2001. 349 p.
8. Kachakhidze M.K., Kachakhidze N.K., Kaladze T.D. A model of the generation of electromagnetic emissions detected prior to earthquakes. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2015. Vol. 85-86. pp. 78–81.
9. Kereselidze Z., Kachakhidze M., Kachakhidze N., Kirtskhalia V. Model of geomagnetic field pulsations before earthquakes occur. *Focus on Science and Technology from a Georgian Perspective*. 2012. pp. 167–178.
10. Kerimov I.A., Ezirbaev T.B. Experiences in the application of multispectral imagery in land cover observation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No.3. pp. 182-194. DOI: 10.46698/VNC. 2022.58.33.001.
11. Khokhryakova V.S. *Introduction to geoinformatics of mining. Textbook for universities*. Yekaterinburg: Publishing house. UGGGA. 2001. 198 p.
12. Matcharashvili T., Chelidze T., Zhukova N. Assessment of the relative ratio of correlated and uncorrelated waiting times in the Southern California earthquakes catalogue. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2015. Vol. 433. pp. 291-303.
13. Matcharashvili T., Chelidze T., Javakhishvili Z., Zhukova N. Variation of the scaling characteristics of temporal and spatial distribution of earthquakes in Caucasus. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 2016. Vol. 449. pp. 136-144.

14. Melkov D., Zaalishvili V., Burdzieva O., Kanukov A. Temporal and Spatial Geophysical Data Analysis in the Issues of Natural Hazards and Risk Assessment (in Example of North Ossetia, Russia). *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022. Vol. 12(6). p. 2790.

15. Lipilin D.A., Evtushenko D.D. Assessment of the urban environment quality using geoinformation systems by the example of microdistricts of the city of Krasnodar. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No.3. pp. 195-210. DOI: 10.46698/VNC.2022.72.93.013

16. Prangishvili A., Gasitashvili Z., Pkhovelishvili M., Archvadze N. Predicting Events by Analyzing the Results of the Work of Predictive Models. *Communications in Computer and Information Science*. 2022. Vol. 1562 CCIS. pp. 64–78.

17. Stoltz M., Stoltz G., Obara K., Wang T., Bryant D. Acceleration of hidden Markov model fitting using graphical processing units, with application to low-frequency tremor classification. *Computers and Geosciences*. 2021. Vol. 156. pp. 104902

18. Tsiramua S., Chikashua E., Tsiramua Z. Logical-Probabilistic Modeling, Optimization and Analysis. *ECC'09: Proceedings of the 3rd international conference on European computing conference*. 2009. pp. 345–347.

19. Yaitskaya N.A., Brigida V.S. Geoinformation technologies in solving three-dimensional geocological problems. Spatial data interpolation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No.1. pp. 162–173. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012

20. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I. Correlation between the value of macroseismic intensity and the indicators of instrumental records of the Gouban earthquake of 2000 and the Tbilisi earthquake of 2002. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No.1. pp. 89–108.

21. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Mel'kov D.A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of northern Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014a. Vol. 50(2). pp. 263–272.

22. Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014b. Vol. 50(5). pp. 707–718.

23. Zaalishvili V., Mel'kov D., Kanukov A., Dzeranov B. Spectral-temporal features of seismic loadings on the basis of strong motion wavelet database. *International Journal of GEOMATE*. 2016. Vol. 10(1). pp. 1656–1661.

24. Zavyalov A.D., Zotov O.D. A New Way to Determine the Characteristic Size of the Source Zone. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2021. Vol. 15(1). pp. 19–25.

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: 1.6.1. Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика; 1.6.4. Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых; 1.6.6. Гидрогеология; 1.6.9. Геофизика; 1.6.10. Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения; 1.6.11. Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений; 1.6.12. Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов; 1.6.20. Геоинформатика, картография; 1.6.21. Геоэкология; 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика; 2.8.8. Геотехнология, горные машины, а также смежных научных направлений.

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. Вла-

дикавказ, ул. Маркова 93а, редакция журнала «Геология и геофизика Юга России».

В редакцию необходимо предоставить следующие материалы:

- статья (структуру и правила оформления см. ниже);
- на отдельной странице: сведения об авторах, содержащие фамилию, имя, отчество, ученую степень, звание, название организации, служебный и домашний адрес и телефоны, e-mail и указание, с кем из авторов предпочтительнее вести переписку;
- направление от организации, если предоставляемые материалы являются результатом работы, выполненной в этой организации; в направлении следует указать название рубрики журнала;
- экспертное заключение или другой документ, разрешающий опубликование в открытой печати, утвержденные руководителем организации и заверенные гербовой печатью (представляют только авторы из России).

Если материалы подаются посредством электронного сервиса, бумажные экземпляры рукописи в редакцию предоставлять не требуется. При онлайн регистрации необходимо руководствоваться пошаговыми инструкциями по загрузке файлов. При отправке материалов почтой необходимо приложить два бумажных экземпляра статьи, подписанных всеми авторами. Подготовленный в соответствии с общими техническими требованиями текст печатается на одной стороне листа формата А4. Аннотация с приведенным в начале названием, авторами, их аффилиацией печатается на отдельном листе. Подписи к рисункам также предоставляются отдельно. Каждая таблица и рисунок должны быть напечатаны на отдельном листе. Внизу страницы с иллюстрацией необходимо указать номер рисунка. Также необходимо приложить электронный вариант на любом портативном накопителе или по согласованию с редакцией направить соответствующие материалы по электронной почте.

Правила оформления статьи

На первой странице должны быть указаны: УДК; название статьи на русском языке (строчными буквами с капитализацией начальной буквы только первого слова в предложении и имен собственных, без кавычек, переносы не допускаются, точка в конце не ставится, подчеркивание не используется), кегль 20 полужирный, выравнивание по центру; инициалы и фамилии авторов, ученая степень и звание (кегль 14 полужирный курсив, выравнивание по центру), название учреждения, почтовый адрес, город, страна представляющих рукопись для опубликования. Указать e-mail для переписки ответственного автора.

Аннотация должна быть объемом 250-300 слов. В ней не рекомендуется использовать формулы и ссылки на литературу. Если рукопись подается на русском языке, то аннотация должна быть продублирована на английском с указанием названия статьи, фамилий и инициалов авторов на этих языках. Если рукопись подается на английском языке, необходимо привести также аннотацию на русском. Аннотация печатается шрифтом Times New Roman (12 кегль). В конце аннотации обязательно указываются ключевые слова (5-8), которые отражают тематику статьи.

Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размером 14 пт через одинарный интервал, выравнивание по формату. Подзаголовок – шрифт курсивный, выравнивание по левому краю. При написании статьи используются общепринятые термины, единицы измерения и условные обозначения, единообразные по всей статье. Расшифровка всех используемых авторами обозначений дается при первом употреблении в тексте. Буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого алфавита – прямым шрифтом. Математические символы \lim , \lg , \ln , \arg , 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 ($MВт/см^2$) – 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 соблюдать 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 the South of Russia” 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: 1.6.1. General and regional geology. Geotectonics and geodynamics; 1.6.4. Mineralogy, crystallography. Geochemistry, geochemical methods of prospecting for minerals; 1.6.6. Hydrogeology; 1.6.9. Geophysics; 1.6.10. Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny; 1.6.11. Geology, prospecting and exploration of oil and gas fields; 1.6.12. Physical geography and biogeography, soil geography and landscape geochemistry; 1.6.20. Geoinformatics, cartography; 1.6.21. Geoinformatics, cartography; 2.8.6. Geomechanics, rock destruction, mine aerogas dynamics and mining thermal physics; 2.8.8. Geotechnology, mining machines, and related scientific areas.

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 , const , \sin , \cos , \min , \max , etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements (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
(№ 1. 2023 г. Том 13)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 05.04.2023 г. Дата фактического выхода 10.04.2023 г.

Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.

Гарнитура «Times». Усл. печ. лист 20,7.

Тираж 100 экз. Заказ № 31.

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