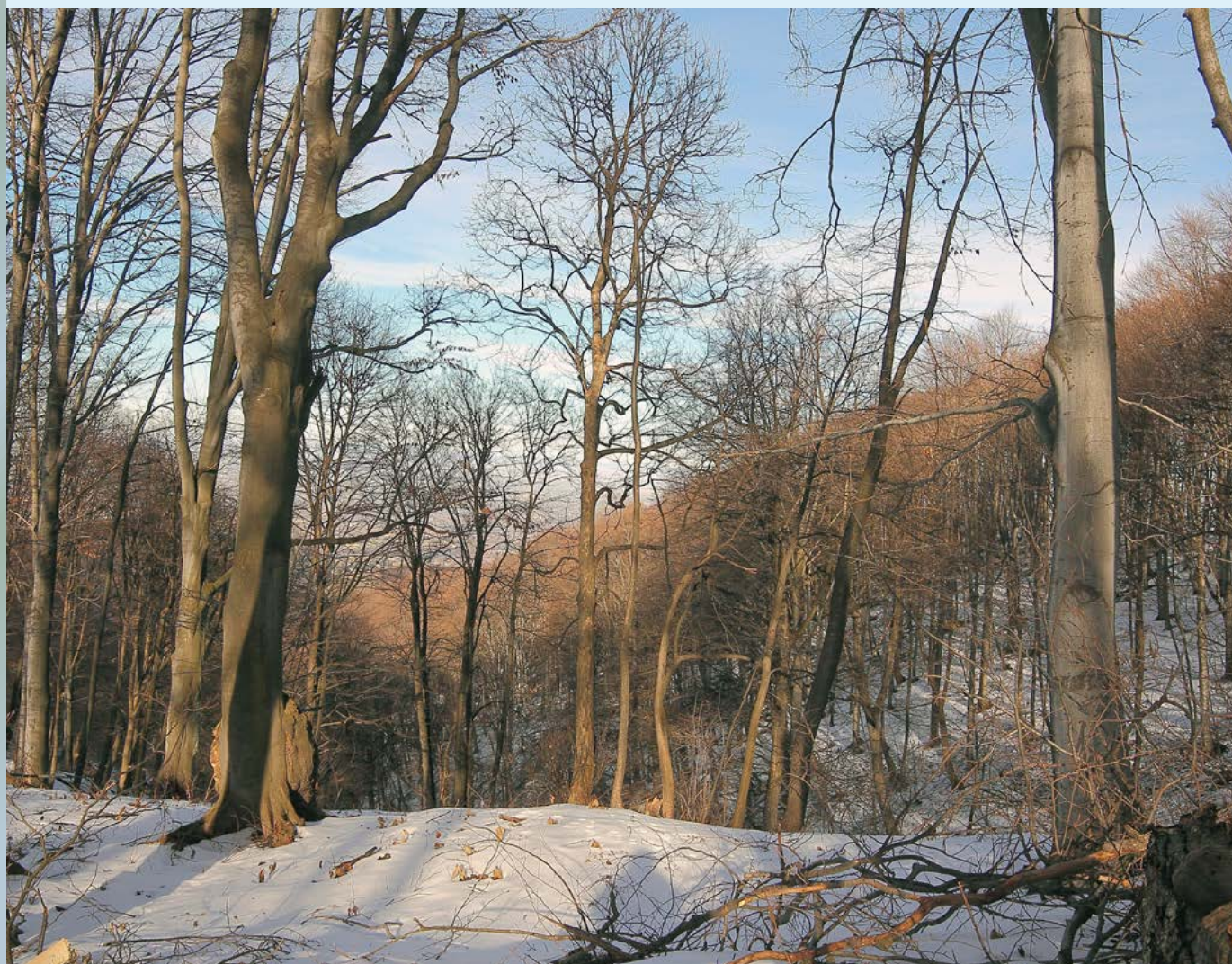


ISSN 2221-3198

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 4 / 2022





ISSN 2221-3198
e-ISSN 2686-7486

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

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

**GEOLOGY AND
GEOPHYSICS
OF RUSSIAN SOUTH**

**Том 12
№ 4 / 2022**

Владикавказ 2022

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

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ph. D., проф. **Ко-Лян Вэнь**, Национальный центральный университет, Тайвань
д.г.м.н. **В.М. Макеев**, Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ответственный секретарь

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

Выпускающий редактор

д.г.-м.н., проф. **С.Г. Парада**

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

Журнал включен в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus

Журнал издается с 2011 года.

Периодичность издания – 4 номера в год

Учредитель:

ВНЦ РАН

Адрес учредителя:
362027, РСО-Алания, г. Владикавказ,
ул. Маркуса 22
Тел.: 8 (8672) 501841
e-mail: vncran@yandex.ru
<http://www.vncran.ru>

Издатель:

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук

Адрес издателя и редакции:
362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а
Тел.: 8 (8672) 764084; факс: 8(8672) 764056
e-mail: southgeo@mail.ru
<http://geosouth.ru>

ISSN 2221-3198

e-ISSN 2686-7486

Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 29119

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

© Геофизический институт ВНЦ РАН, 2022

Фото на обложке – Тарская гора (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. Rylnikova Dr. Sci. (Tech.), Prof., Institute
of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Yuriy K. Chernov Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., North
Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation
(Scopus Author ID - 6508237062)

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

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

Executive Secretary

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

Managing Editor

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

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

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

The Journal is published since 2011.
Frequency of publication – 4 issues per year

Founder:

Vladikavkaz Scientific Center of RAS

Founder address:

22, Markusa Str., Vladikavkaz, RNO-Alania,

362027 Russia

Tel.: +7 (8672) 501841

e-mail: vncran@yandex.ru

http://www.vncran.ru

Publisher:

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

Publisher and Editorial address:

93a, Markova Str., Vladikavkaz, RNO-Alania, 362002 Russia

Tel.: 8 (8672) 764084; Fax: +7 (8672) 764056

e-mail: southgeo@mail.ru

http://geosouth.ru

ISSN 2221-3198

e-ISSN 2686-7486

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

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

© Geophysical Institute VSC RAS, 2022

Cover photo – Tarskaya mountain (K.S. Kharebov)

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ	
Караваев В. А., Горбунов А. С., Семиноженко С. С.	
Роль слабых землетрясений в цикле экстремальных экзогенных процессов в горах Центрального Кавказа	6
ГЕОТЕКТНИКА И ГЕОДИНАМИКА	
Етирмишли Г. Д., Казымов И. Е.	
Современная GPS-геодинамика Азербайджана	19
Макеев В. М., Ревазов М. О., Болотаева А. Г.	
Структурно-геодинамические исследования южного склона Большого Кавказа в районе Двалетского поднятия в связи с оценкой зон нарушений	31
ГЕОФИЗИКА	
Евдокимова О. В., Бабешко В. А., Павлова А. В., Евдокимов В. С., Бабешко О. М.	
Об одном новом предвестнике повышенной сейсмичности.....	47
Керимов И. А.	
Моделирование гравитационного поля систем разломов и зон трещиноватости	59
Мельков Д. А., Габараев А. Ф., Фидарова М. И., Мерзликин Т. И., Персаева З. В.	
Влияние нелинейных свойств среды на сейсмический эффект сильных землетрясений	72
Чернов Ю. К., Заалишвили В. Б., Чернов А. Ю.	
Некоторые новые данные о влиянии различных грунтовых условий на вероятностные оценки сейсмической опасности территорий	85
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ	
Саидова К. М., Луценко О. О., Черненко К. И., Рыжевский Т. И.	
Моделирование сети трещин в объеме природных резервуаров нефтекумских отложений Зимне-Ставкинско-Правобережного месторождения на основе промыслово-линеamentного метода в программном обеспечении Petrel.....	100
ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ	
Босиков И. И., Ключев Р. В., Мазко А. И., Бурдзиев О. Г.	
Оценка устойчивости плоской поверхности кристалла при фазовом превращении в однокомпонентной системе	114
Парада С. Г.	
Потенциально золотоносные минерализации в углеродистых породах Малка- Муштинского рудного узла (Северный Кавказ).....	129
Юсупов А. Р., Мамаев С. А., Юсупов З. А., Мамаев А. С.	
Цеолитсодержащие кремнистые породы Дагестана как добавка для получения керамической волластонитсодержащей облицовочной плитки.....	142
ГЕОЭКОЛОГИЯ	
Маркарова М. Ю., Махмудова Л. Ш., Керимов И. А., Эльжаев А. С., Мамадиев Н. А.	
Анализ парниковых газов на нефтезагрязненных территориях и разработка методов их биорекультивации (на примере г. Грозный)	153
Нуреев Р. Р., Пашкевич М. А., Харько П. А.	
Оценка воздействия отходов обогащения медных руд на поверхностные и подземные воды	169
Скрипчинский А. В., Бадов А. Д., Бадов О. А., Борисов Д. Д.	
Анализ состояния водоохранной зоны городского округа Дербент на основе ГИС-технологий.....	180

CONTENTS

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

Karavaev V. A., Gorbunov A. S., Seminozhenko S. S.

- Role of weak earthquakes in the cycle of extreme exogenous processes in the mountains
of the Central Caucasus 6

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

Yetirmishli G. J., Kazimov I. E.

- Modern GPS geodynamics of Azerbaijan 19

Makeev V. M., Revazov M. O., Bolotaeva A. G.

- Structural and geodynamic studies of the southern slope of the Greater Caucasus
in the region of the Dvaletsky uplift in respect of the assessment of fractured zones 31

GEOPHYSICS

Evdokimova O. V., Babeshko V. A., Pavlova A. V., Evdokimov V. S., Babeshko O. M.

- About one new precursor of increased seismicity 47

Kerimov I. A.

- Modeling the gravitational field fault systems and fracture zones 59

Melkov D. A., Gabaraev A. F., Fidarova M. I., Merzlikin T. I., Persaeva Z. V.

- Influence of nonlinear properties of the medium on the seismic effect of strong earthquakes 72

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 85

GEOPHYSICAL METHODS

Saidova K. M., Lutsenko O. O., Chernenko K. I., Ryzhevskiy T. I.

- Modeling of network of fractures in the volume of natural reservoirs of Neftekumsk
deposits of Zimne-Stavkinsko-Pravoberezhnoye field based on field-lineament method
in Petrel software 100

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY

Bosikov I. I., Klyuev R. V., Masko A. I., Burdzhev O. G.

- Evaluation of the stability of a flat surface of a crystal under a phase transformation
in a single-component system 114

Parada S. G.

- Potentially gold-bearing mineralizations in carbonaceous rocks of the Malka-Mushta
Ore node (North Caucasus) 129

Yusupov A. R., Mamaev S. A., Yusupov Z. A., Mamaev A. S.

- Zeolite-containing siliceous rocks of Dagestan as an additive for the production of ceramic
wollastonite-containing facing tiles 142

GEOECOLOGY

Markarova M. Yu., Makhmudova L. Sh., Kerimov I. A., Elgaev A. S., Mamadiev N. A.

- Analysis of greenhouse gases in oil-controlled areas and development of methods for their
biorecultivation (for example of Grozny) 153

Nureev R. R., Pashkevich M. A., Kharko P. A.

- Assessment of the impact of Copper Ore Enrichment Waste on Surface
and Groundwater 169

Skripchinsky A. V., Badov A. D., Badov O. A., Borisov D. D.

- Water protection zone state analysis of the Derbent city district on the basis
of GIS technologies 180

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 551.435.6 (470.64)

DOI: [10.46698/VNC.2022.19.24.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.19.24.001)

Оригинальная статья

Роль слабых землетрясений в цикле экстремальных экзогенных процессов в горах Центрального Кавказа

В. А. Караваев¹, А. С. Горбунов², С. С. Семиноженко³

¹Институт географии РАН, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 24, стр. 4,
e-mail: karavaev@igras.ru;

²Рослесинфорг, Россия, 109316, г. Москва, Волгоградский пр-т, 45, стр. 1,
e-mail: grey_wolf.88@mail.ru;

³Воронежский государственный университет, Россия, 394018, г. Воронеж,
Университетская пл., д. 1, e-mail: gorbunov.ol@mail.ru

Статья поступила: 17.10.2022, доработана: 15.11.2022, одобрена в печать: 21.11.2022

Резюме: Актуальность работы. Изучение влияния тектоники и сейсмичности на функционирование горных ландшафтов видится очень перспективным и актуальным. Например, поиск связи глубинных источников тектонических напряжений друг с другом и их возможного влияния на приповерхностную геодинамику и сейсмический режим, которые могут стать основой геоэкологического районирования. **Цель предлагаемого исследования** – выявить особенности воздействия слабых землетрясений на течение экзогенных процессов в горах Центрального Кавказа. Мы предполагаем, что процессы, которые связаны с накоплением и передвижением обломочного материала – обвально-осыпные и сели, подчиняются цикличности и подвержены комплексному влиянию ряда факторов, как изменяющихся со временем, так и постоянных – температуры воздуха, осадков, морозного выветривания, морфометрических показателей рельефа, сейсмичности и свойств горных пород, среди которых землетрясения являются одним из ведущих. Новизна заключается в их совместном анализе. Цикл развития экстремальных экзогенных процессов (далее – ЭЭП), в ходе которого одни обуславливают другие, способен длиться в течение ряда лет. Авторы изучают ЭЭП в бассейне р. Черек Балкарского, начиная с 2009 г., где их цикл составляет от 3 до 6 лет. Одновременная активность нескольких факторов, причём, в значительной степени, не непосредственная, а заблаговременная, предопределила завершение предыдущего цикла ЭЭП летом 2017 г. **Методы работы** базировались на расчётах интенсивности землетрясений на поверхности в районе исследования, исходя из их силы в различных эпицентрах и глубины последних и принимая во внимание региональные константы. **Результаты работы.** Выявлено, что помимо подготовительной роли, в цикле ЭЭП слабые землетрясения могут выполнять функцию «спускового механизма» для крупных селей. Так, в июле 2012 г. и июле 2017 г., когда сходы подобных селей завершили на исследуемой территории очередные циклы экстремальных экзогенных процессов, «спусковым механизмом» в обоих случаях послужили слабые 3-хбальные землетрясения и, во втором случае в значительно меньшей степени, – небольшое превышение температуры воздуха, усилившее таяние ледников в высокогорье.

Ключевые слова: факторы формирования, землетрясения, цикл, экстремальные экзогенные процессы, горный ландшафт, обломочный материал, Центральный Кавказ.

Благодарности: Исследование проведено в Институте географии РАН по государственному заданию Института АААА-А19-119021990091-4 (FMGE-2019-0005). Авторы благодарны сотрудникам Кабардино-Балкарского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (директор – Е. М. Богаченко) за предоставленные метеорологические данные.

Для цитирования: Караваев В. А., Горбунов А. С., Семиноженко С. С. Роль слабых землетрясений в цикле экстремальных экзогенных процессов в горах Центрального Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (4): 6-18. DOI: [10.46698/VNC.2022.19.24.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.19.24.001).

DOI: [10.46698/VNC.2022.19.24.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.19.24.001)

Original paper

Role of weak earthquakes in the cycle of extreme exogenous processes in the mountains of the Central Caucasus

V. A. Karavaev¹, A. S. Gorbunov², S. S. Seminozhenko³

¹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 29, build. 4 Staromonetnyi lane, Moscow 119017, Russian Federation, e-mail: karavaev@igras.ru;

²Roslesinforg, 45, build. 1 Volgogradsky avenue, Moscow 109316, Russian Federation, e-mail: grey_wolf.88@mail.ru;

³Voronezh State University, 1 Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russian Federation, e-mail: gorbunov.ol@mail.ru

Received: 17.10.2022, revised: 15.11.2022, accepted: 21.11.2022

Abstract: Relevance. The study of the influence of tectonics and seismicity on the functioning of mountain landscapes seems to be very promising and relevant. For example, the search for a connection between deep sources of tectonic stresses and their possible impact on near-surface geodynamics and seismic regime, which can become the basis of geoecological zoning. **The aim of the proposed study** is to reveal the features of the impact of weak earthquakes on the course of exogenous processes in the mountains of the Central Caucasus. The article assumes that the processes associated with the accumulation and movement of clastic material – landslide-scrree and debris flows, have a cyclical nature and are subject to the complex effect of several factors that change over time – air temperature, precipitation, frost weathering and seismicity, among which earthquakes are one of leading. The novelty is their joint consideration. The cycle of development of extreme exogenous processes (hereinafter – EEP), during which some cause others, can last for a number of years. In the Cherek Balkarsky river basin, where the authors have been conducting research since 2009, it is from 3 to 6 years. The prerequisite for the completion of the previous EEP cycle in the summer of 2017 was the joint activity of several factors, and, to a large extent, not immediately, but in advance. **The methods of work** were based on calculations of the intensity of earthquakes on the surface in the study area, based on their strength at various epicenters and the depth of the latter, and taking into account regional constants. **Results.** It was revealed that in addition to the preparatory role, weak earthquakes in the EEP cycle can act as a “trigger” for large debris flows. So, in July 2012 and July 2017, when similar debris flows completed the next cycles of extreme exogenous processes in the study area, weak 3-magnitude earthquakes served as a “trigger” in both cases and, in the second case, to a much lesser extent, – a slight increase in air temperature, which increased the melting of glaciers in the highlands. Key words: formation factors, earthquakes, cycle, extreme exogenous processes, mountain landscape, clastic material, Central Caucasus.

Keywords: formation factors, earthquakes, cycle, extreme exogenous processes, mountain landscape, debris, Central Caucasus.

Acknowledgments: The study was carried out at the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences in accordance with the state task of the Institute AAAA-A19-119021990091-4 (FMGE-2019-0005). The authors thank the Kabardino-Balkarian Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Director E. M. Bogachenko) for providing meteorological data.

For citation: Karavaev V. A., Gorbunov A. S., Seminozhenko S. S. Role of weak earthquakes in the cycle of extreme exogenous processes in the mountains of the Central Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (4): 6-18. DOI: 10.46698/VNC.2022.19.24.001.

Введение

Изучение влияния тектоники и сейсмичности на функционирование горных ландшафтов видится очень перспективным и актуальным. Например, поиск связи глубинных источников тектонических напряжений друг с другом и их возможного влияния на приповерхностную геодинамику и сейсмический режим, которые могут стать основой геоэкологического районирования [Стогний и др., 2022; Scholz, 2019].

Роль землетрясений в активизации экзогенных процессов¹ традиционно является предметом исследований – спровоцированные сейсмическими событиями оползни, обвалы, сели и лавины имеют часто большую разрушительную силу [Куровская и др., 2020; Махинов, 2020]. Так, 12 мая 2008 г. на юго-западе Китая произошло Вэньчуаньское землетрясение магнитудой 7,9...8, само по себе принесшее многочисленные жертвы и большие разрушения. Однако другие масштабные его последствия были отсрочены на два года – 8 августа 2010 г. после обильных ливневых дождей в провинции Ганьсу сошли крупные сели с участием подготовленного землетрясением обломочного материала [Horton et al., 2019; Tangetal., 2018; Pasquale et al., 2022].

Как видим, речь идёт выше о сейсмических событиях большой силы, всегда ведущих к началу экзогенных процессов или их усилению. В предлагаемом исследовании мы уделяем первостепенное внимание, прежде всего, слабым и средней силы землетрясениям, которые случаются гораздо чаще, с отсрочкой эффекта и которые действуют совместно с другими факторами, повышающими активность селей, лавин, осыпей, быстрых оползней, обвалов и камнепадов.

Для выявления специфики экзогенных процессов Центрального Кавказа мы, начиная с 2009 г., проводим исследования на территории, репрезентативной для всего региона – в бассейне р. Черёка Балкарского, в верхнем его течении, и бассейнах его истоков – Карасу и Дыхсу (рис. 1).

Территория исследований входит в сейсмически активную южную часть Европейской России – полосу шириной 200...300 км вдоль государственной границы, где возможны землетрясения интенсивностью до 10 баллов (по 12-балльной шкале интенсивности землетрясений Медведева – Шпонхойера – Карника – MSK-64) [Уломов, 2008]. Анализируя описания ощущений от землетрясений различной силы и оценив перемещение обломочного материала в результате их действия, мы решили, что минимальным значением, которое следует учитывать в нашей работе, является 3 балла по шкале MSK-64, характеризующееся как «сотрясение поверхности от проезжающего рядом грузовика».

Постановка задачи: цикл экстремальных экзогенных процессов на территории исследования

В горных условиях образуются особые типы геосистем, которые обязаны своим происхождением экзогенным процессам – селевым, лавинным, обвальным-осыпным и т. д. Выявление и изучение подобных комплексов представляет как теоретическую, так и очевидную прикладную ценность. Для этого на территории

¹ Под активностью понимается частота и интенсивность проявления процесса в единицу времени. Термин «экстремальные» в отношении изучаемых процессов подчёркивает их большую силу, намного превышающую фоновые проявления процессов и быстроедействие, которое не даёт местным геосистемам времени для адаптации.

исследования, которая включает в себя среднегорные и высокогорные участки, с 2009 г. регулярно обследуется 10 ключевых, наиболее показательных, очагов развития разнородных экстремальных экзогенных процессов: селево-лавиновых комплексов Метиан-Суу (в верховьях р. Черек Балкарского), Тютюн-Су (в среднем его течении), Ахсу и Ортозюрк (притоки р. Карасу в верхнем её течении), безымянного ручья в долине р. Лъкези, оползень в долине р. Карасу, очаги активности обвально-осыпных процессов в долине р. Лъкези и на участках вблизи ледников Штулу Западный и Штулу Восточный, а также осыпь в верхнем течении р. Черек Балкарского (рис. 2).

Мы предполагаем, что опасные (экстремальные) экзогенные процессы, связанные с накоплением и перемещением обломочного материала – обвально-осыпные процессы и сели – образуют цикл. Схема цикла: после схода крупных селей в горном ландшафте в результате обвально-осыпных, русловых процессов, сходов лавин начинает накапливаться обломочный материал. По достижении критической массы, даже при слабом воздействии любого из факторов, случается следующий сход. Основные факторы, приводящие к формированию цикла: осадки, температура воздуха, сейсмичность, морозное выветривание, морфометрические показатели рельефа, состав обломочного материала и его морфологические особенности. Учет последнего фактора предполагает выявление свойств грунтов, вызывающих их ответные реакции на воздействия других факторов. В свете поставленной в статье задачи – землетрясений: оценка нелинейных свойств грунтов, которые проявляются при сейсмических воздействиях [Заалишвили и др., 2021].



Рис. 1. Территория исследования /
Fig. 1. Study area

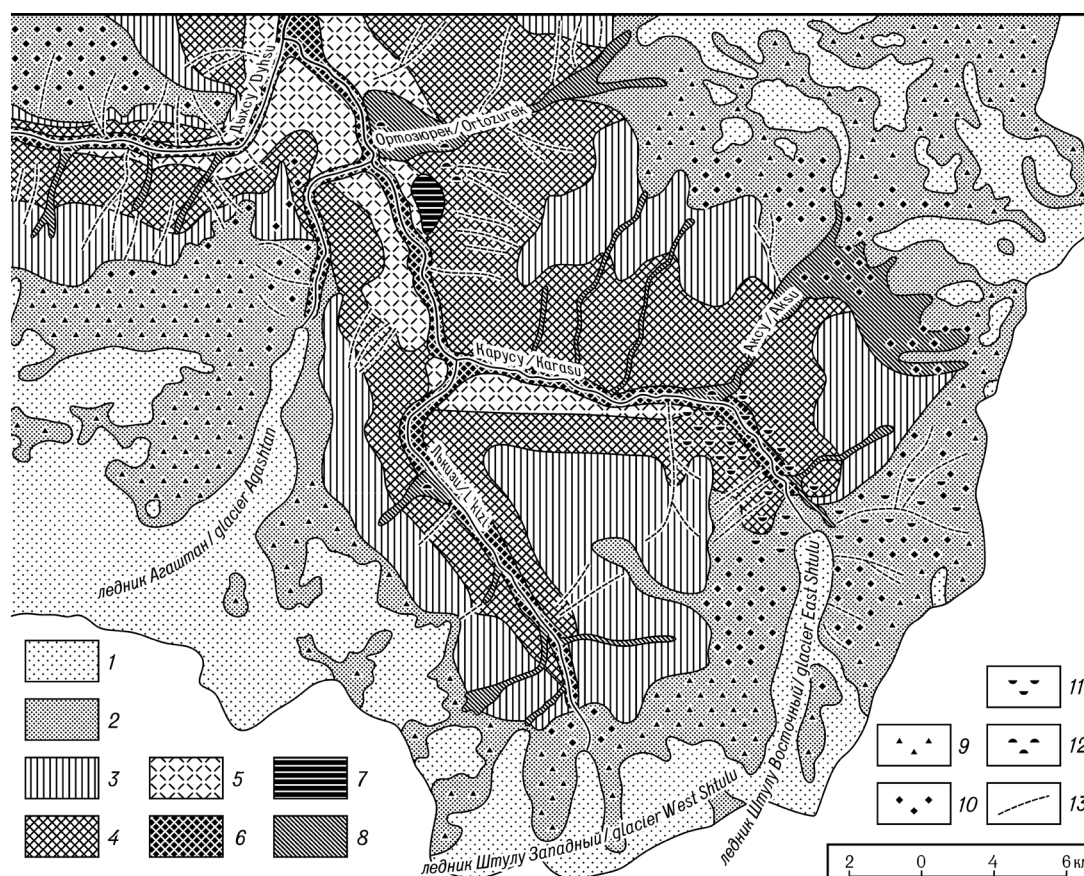


Рис. 2. Ландшафтные местности и участки интенсивного проявления экзогенных процессов [Каравеев и др., 2020; с изменениями]. Типы ландшафтных местностей: 1 – нивальные, 2 – субнивные, 3 – альпийские, 4 – субальпийские, 5 – горно-лесные, 6 – речных долин, 7 – болотные, 8 – селевые и селево-лавиновые. Участки интенсивного проявления экзогенных процессов: 9 – нивально-гравитационных, 10 – гравитационных, 11 – оползневых, 12 – пролювиальных; Линии развития экзогенных процессов: 13 – лавинные лотки /

Fig. 2. Landscape areas and areas of intense manifestation of exogenous processes [Karavaev et al., 2020; with changes]. Types of landscape areas: 1 – nival, 2 – subnival, 3 – alpine, 4 – subalpine, 5 – mountain-forest, 6 – river valleys, 7 – marsh, 8 – mudflow and mudflow-avalanche. Areas of intensive manifestation of exogenous processes: 9 – nival-gravitational, 10 – gravitational, 11 – landslide, 12 – proluvial; Lines of development of exogenous processes: 13 – avalanche flumes.

Новизной подхода является совместный анализ различных факторов, который позволил выявлять «кумулятивный эффект», при котором складываются даже слабые их проявления, способные вызвать финальный сход селя, завершающий цикл. Стабильному его течению способствует соответствие средним многолетним трендам как абсолютных показателей факторов, меняющихся во времени – температуры воздуха, осадков, морозного выветривания, сейсмичности, – так и их временного хода – суточного, недельного, месячного и т. д.

В исследуемом районе, как показали наблюдения, цикл составляет 3...6 лет.

Методика исследования

На начальном этапе исследования влияния землетрясений необходимо было определить начальную точку отсчёта – минимальную силу сейсмического события, которую мы принимаем во внимание. Анализируя описания ощущений от земле-

трясений различной силы и оценив перемещение обломочного материала в результате их действия, мы решили, что минимальным значением, которое следует учитывать в нашей работе, является 3 балла по шкале MSK–64, характеризующее как «сотрясение поверхности от проезжающего рядом грузовика».

Далее предстояло выбрать базу данных, откуда предстояло черпать данные о землетрясениях. Первоначально для расчёта воздействия землетрясений на исследуемую территорию мы одновременно пользовались данными из двух источников – Единой геофизической службы РАН (<http://www.seme.gsras.ru/new/catalog>) и Северо-Калифорнийского центра учёта землетрясений (Northern California Earthquake Data Center) (<https://www.ncedc.org/>). Данные различаются – американская станция регистрирует большее количество событий. Магнитуда совпадающих по времени обеих станций землетрясений по американским данным, как правило, выше, а эпицентры расположены глубже. Тем не менее, подобные расхождения практически не влияют на цикл экзогенных процессов в бассейне Черёка Балкарского. Учитывая это, а также большую трудоёмкость подобного подхода, впоследствии мы отказались от него и выбрали за источник информации каталог Геологической службы США (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>).

Расчёт проводился по формуле:

$$I = 2.2 + 1.6 \cdot M - 3.1\sqrt{R^2 + h^2},$$

где I – интенсивность землетрясения, в баллах; M – магнитуда; R – расстояние от эпицентра в км; h – глубина эпицентра, км; 2,2, 1,6, 3,1 – региональные константы [Инженерное..., 1998].

Результаты расчётов были сведены в таблицу, где указывалось географическое положение эпицентра, его координаты, глубина, магнитуда и сила толчков на территории исследования (табл. 1).

Помимо таблицы, на основе полученных данных была построена карта-схема, которая позволяет географически представить картину воздействия землетрясений в различных, порой сильно удалённых эпицентрах, на исследуемый район, а также выявить наиболее активно влияющие на него эпицентры.

Результаты работы и их обсуждение: землетрясения на территории исследования

На территории исследования сказываются землетрясения, эпицентры которых расположены в различных местах, порой находящихся на большом удалении от неё, как например, в Эгейском море, севернее острова Самос (рис. 3а) [Lentas et al., 2022]. Самая многочисленная периодически активная группа – 8 событий в разные годы – была выявлена в районе Рачинского хребта, недалеко от Кутаиси. Три землетрясения были зафиксированы вблизи юго-восточной части Главного Кавказского, по 2 – севернее Бзыбского хребтов, юго-западнее г. Эльбруса (рис. 3б) [Габсатарова и др., 2019] и в северо-западной части Загроса (рис. 5г) [Рогожин и др., 2018]. В некоторых эпицентрах серии сейсмических событий происходили в один день – 3 случились в восточной части озера Ван и около неё (рис. 3в) [Аптикаева, 2019; Elliott et al., 2013], по 2 – южнее Карадага (см. рис. 3г) [Етирмишли др., 2018] и восточнее Курдистанского хребта (см. рис. 3в), а также в Черном море, северо-западнее Поти (см. рис. 3б). В остальных местах были отмечены единичные землетрясения, отголоски которых докатились до долины р. Карасу² (табл. 1).

² <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (дата обращения 21.12.2021)

Таблица 1 / Table 1

Землетрясения на территории исследования с 2010 г. по 2021 г. /
Earthquakes in the study area from 2010 to 2021

№	Географическое положение эпицентра / Geographic position epicenter	Координаты эпицентра / Epicenter coordinates		Дата / Data	Глубина (h), км / Depth (h), km	Магнитуда (M) / Magnitude (M)	Интенсивность (J), баллы / Intensity (J), points
		Широта / Latitude	Долгота / Longitude				
1	Эгейское море (о. Самос) / Aegean Sea (Samos Island)	37°53'50.28"	26°47'01.68"	30.10.20	21	7,0	3,55
2 ¹	Бухта Бодрум / Bodrumbay	36°55'45.48"	27°24'50.04"	20.07.17	7	6,6	2,90
3	Отроги Армянского Тавра / Spurs of the Armenian Taurus	38°25'52.32"	39°03'39.24"	24.01.20	10	6,7	4,27
4	Отроги Армянского Тавра / Spurs of the Armenian Taurus	38°51'50.40"	39°59'09.60"	08.03.10	12	6,1	3,50
5	Внутренний Тавр / Inner Taurus	39°25'22.44"	40°42'26.28"	14.06.20	10	5,9	3,55
6	Акватория оз. Ван / The water area of the lake Van	38°38'02.40"	43°04'37.20"	21.10.11	5	5,9	3,33
7	Акватория оз. Ван / The water area of the lake Van	38°48'32.40"	43°17'60.00"	23.10.11	5	5,7	3,07
8	Акватория оз. Ван / The water area of the lake Van	38°43'15.60"	43°30'28.80"	23.10.11	18	7,1	5,27
9	Курдистанский хребет / Kurdistan Range	38°29'44.88"	44°22'23.52"	23.02.20	10	6,0	3,42
10	Курдистанский хребет / Kurdistan Range	38°26'47.40"	44°25'00.48"	23.02.20	10	5,8	3,09
11	Северо-Западный Загрос / Northwestern Zagros	34°54'39.24"	45°57'33.12"	12.11.17	19	7,3	4,69
12	Северо-Западный Загрос / Northwestern Zagros	34°21'39.24"	45°44'39.48"	25.11.18	18	6,3	3,01
13	Карадаг / Karadag	38°23'20.40"	46°44'42.00"	11.08.12	12	6,2	3,54
14	Карадаг / Karadag	38°19'44.40"	46°49'33.60"	11.08.12	11	6,4	3,84
15	Скалистый хребет / Rocky ridge	41°32'56.40"	46°47'20.40"	14.10.12	10	5,5	3,39
16	Самурский хребет / Samur Range	41°32'56.40"	46°47'20.40"	07.05.12	11	5,6	3,37
17	Большой Кавказ / Greater Caucasus	42°08'46.32"	45°48'42.12"	17.09.13	5	5,3	3,39
18	Район Рачинского хребта / The area of the Rachinsky ridge	42°31'48.00"	44°08'38.40"	20.07.12	10	4,3	3,12
19	Район Рачинского хребта / The area of the Rachinsky ridge	42°25'24.96"	43°37'06.96"	13.03.18	12.5	4,4	3,60
20	Район Рачинского хребта / The area of the Rachinsky ridge	42°31'58.80"	43°35'46.68"	06.11.18	10	5,0	4,83

21	<i>Район Рачинского хребта / The area of the Rachinsky ridge</i>	42°33'39.60"	43°26'9.60"	12.04.10	10	4,1	3,58
22	<i>Район Рачинского хребта / The area of the Rachinsky ridge</i>	42°34'49.44"	43°23'10.68"	13.03.21	10	4,1	3,67
23	<i>Район Рачинского хребта / The area of the Rachinsky ridge</i>	42°22'44.04"	43°01'30.72"	18.11.15	3,5	4,1	3,07
24	<i>Район Рачинского хребта / The area of the Rachinsky ridge</i>	42°36'21.60"	42°56'52.80"	23.10.11	5	5,9	3,33
25	<i>Район Рачинского хребта / The area of the Rachinsky ridge</i>	42°20'04.56"	42°47'27.60"	29.06.18	10	4,4	3,30
26	<i>Район Месхетского хребта / The area of the Meskheta ridge</i>	41°57'39.60"	42°39'25.20"	19.01.11	10	5,2	4,03
27	<i>Большой Кавказ / Greater Caucasus</i>	43°15'07.20"	41°39'43.20"	28.05.13	4,8	5,1	3,72
28	<i>Большой Кавказ / Greater Caucasus</i>	43°13'8.40"	41°38'13.20"	26.03.13	10	5,1	3,70
29	<i>Акватория Черного моря / Black Sea water area</i>	42°25'12.00"	41°04'30.00"	25.12.12	10	5,2	3,38
30	<i>Акватория Черного моря / Black Sea water area</i>	42°26'09.60"	40°58'26.40"	25.12.12	10	5,2	3,38

¹ Жирным шрифтом выделены данные о землетрясениях, которые могли спровоцировать сходы крупных селей в районе исследования

Как уже отмечалось, методика исследования предполагает совместный анализ основных факторов проявления экзогенных процессов. Отображения факторов, которые меняются во времени, для удобства анализа помещены друг под другом в одном временном масштабе. Помимо землетрясений, это графики температуры воздуха, осадков и морозного выветривания, которое отражается в количестве переходов температуры воздуха через точку замерзания – ноль градусов по Цельсию. Во избежание перегрузки статьи иллюстрациями, мы приводим здесь совмещённые графики только за период с 2016 г. по 2021 г. (рис. 4). С начала исследования территории и, соответственно, расчётов землетрясений, с 2008 г. по июль 2012 г., когда завершился первый из отмеченных нами циклов экстремальных экзогенных процессов, в долинах р. Черёка Балкарского, его истоков и притоков, случилось 14 землетрясений силой от 3,1 до 6,6 баллов, причём «спусковым механизмом» послужило землетрясение в 3,1 балла – температура воздуха соответствовала многолетнему тренду, а осадки значительно отставали от него. Во время следующего цикла произошло 29 землетрясений, силой от 3 до 4,8 баллов (см. рис. 4г). Серия крупных селей сошла в исследуемом районе в июле 2017 г., что мы принимаем за окончание очередного цикла. Обратим внимание на то, что осадки в том месяце были скудными по июльским меркам – всего 67 мм, что больше, чем на 20 мм отстаёт от нормы (см. рис. 4б).

Ситуация с морозным выветриванием была стандартной – в июне был зафиксирован один переход температуры воздуха через точку замерзания воды, в июле – ни одного. Наиболее активным морозное выветривание было традиционно в марте – 27 и апреле – 22 перехода соответственно, что тоже соответствовало многолетнему тренду (см. рис. 4в).

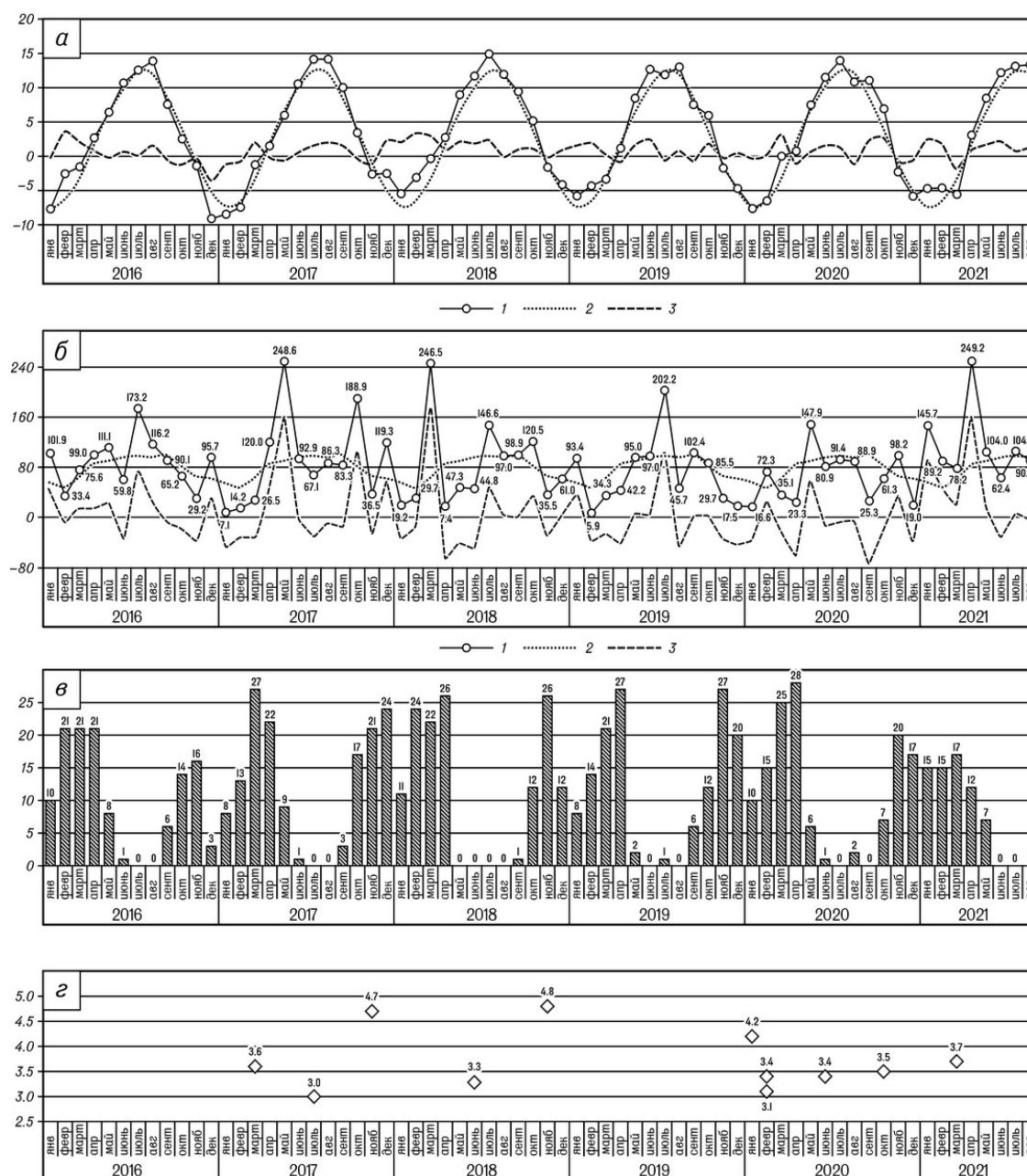


Рис. 4. Факторы формирования экстремальных экзогенных процессов в 2016-21 гг.: а – температура воздуха, °C, б – осадки, мм, в – количество дней с переходами температуры воздуха через 0°C, г – землетрясения, интенсивность в баллах; 1 – среднемесячные значения за год, 2 – среднемесячные значения за 1951-2013 гг., 3 – отклонения среднемесячных значений за год (1) от среднемесячных значений за 1951-2013 гг. (2) /

Fig. 4. Factors of formation of extreme exogenous processes in 2016-21: a – air temperature, °C, b – precipitation, mm, c – number of days with air temperature transitions through 0 °C, d – earthquakes, intensity in points; 1 – average monthly values for the year, 2 – average monthly values for 1951-2013, 3 – deviations of average monthly values for the year (1) from average monthly values for 1951-2013 (2)

Выводы

Помимо очевидной роли подготовки обломочного материала, слабые землетрясения могут выполнять функцию «спускового механизма» для крупных селей, завершающих цикл опасных экзогенных процессов.



*Рис. 5. Низовья р. Метиан-Суу после схода крупного селя в июле 2017 г.
(фото В. А. Караваева, 18 июля 2017 г.) /*

*Fig. 5. Lower river Metian-Suu after a large debris flow in July 2017
(photo by V.A. Karavaev, July 18, 2017)*

В июле 2012 г. и июле 2017 г. сошли крупные сели, завершив, таким образом, на исследуемой территории очередные циклы экстремальных экзогенных процессов. Катализатором в обоих случаях послужили слабые 3-хбалльные землетрясения и, во втором случае в значительно меньшей степени, – небольшое превышение температуры воздуха, вызвавшее таяние ледников в высокогорье.

Литература

1. Аптикаева О. И. Особенности Ванских землетрясений 1976 и 2011 гг., роевая сейсмичность и поле поглощения S-волн. // *Геология и Геофизика Юга России*. – 2019. – Т. 9 (3). – С. 105-118. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36475
2. Габсатарова И. П., Королежки Л. Н., Селиванова Е. А., Артёмова Е. В., Каменская О. П. Северный Кавказ. // *Землетрясения Северной Евразии*. – 2019. – № 22. – С. 82-95. DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.07
3. Етирмишли Г. Д., Абдуллаева Р. Р., Исмаилова С. С., Казымова С. Э. Азербайджан. // *Землетрясения Северной Евразии*. – 2018. – № 21 (2012). – С. 59-66.
4. 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
5. Инженерное обеспечение мероприятий и действий сил ликвидации чрезвычайных ситуаций. Кн. 2. Оперативное прогнозирование инженерной обстановки в чрезвычайных ситуациях. / С.К. Шойгу (под общ. ред.). – М.: Папирус, 1998. – 166 с.

6. Караваев В. А., Семиноженко С. С. Цикл экстремальных геоморфологических процессов в бассейне реки Черек Балкарский. // Геоморфология. – 2016. – № 2. – С. 34-40. DOI: 10.15356/0435-4281-2016-2-34-40
7. Караваев В. А., Федин А. В., Семиноженко С. С. Новый цикл опасных процессов в высокогорье Центрального Кавказа. // Жизнь Земли. – 2020. – Т. 42. № 2. – С. 136-142. DOI: 10.29003/m1383.0514-7468.2020_42_2/136-142
8. Кешева Л. А., Теунова Н. В. Изменение температурного режима в различных климатических зонах Кабардино-Балкарской Республики. // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук. – 2021. – Т. 21. № 1. – С. 46-51. DOI: 10.47928/1726-9946-2021-21-1-46-51
9. Куровская В. А., Черноморец С. С., Висхаджиева К. С. Оценка количественных характеристик селевого потока 2015 г. в долине р. Барсемдара (Таджикистан) по видеоматериалам и результатам моделирования. // Геориск. – 2020. – № 3. – С. 8-11. DOI: 10.25296/1997-8669-2020-14-3-12-22
10. Махинов А. Н. Крупный оползень и вызванное им цунами в Бурейском водохранилище. // Геоморфология. – 2020. – № 3. – С. 31-43. DOI: 10.31857/S0435428120030086
11. Рогожин Е. А., Собисевич А. Л., Собисевич Л. Е., Канониди К. Х. О разрушительном землетрясении на границе Ирана с Ираком. // Геофизические процессы и биосфера. – 2018. – Т. 17. № 2. – С. 5-22. DOI: 10.21455/gpb2018.2-1
12. Стогний В. В., Заалишвили В. Б., Пономарёва 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
13. Ташилова А. А., Кешева Л. А., Теунова Н. В. Анализ режима осадков на Северном Кавказе за последние 60 лет. // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. – М.: Ин-т истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН, 2022. – С. 671-675.
14. Уломов В. И. Выявление потенциальных очагов и долгосрочный прогноз сильных землетрясений на Северном Кавказе. // Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. 1. Сейсмические процессы и катастрофы. / Под ред. А. О. Глико. – М.: ИФЗРАН, 2008. – С. 127-146.
15. Elliott J., Copley A., Holley R., Scharer K., Parsons B. The 2011 Mw 7.1 Van (Eastern Turkey) earthquake. // J. Geophys. Res. Solid Earth. – 2013. – Vol. 118. –pp. 1619-1637.
16. Horton A. J., Hales T. C., Ouyang C., Xuanmei F. Identifying post-earthquake debris flow hazard using Massflow. // Engineering Geology. – 2019. – Vol. 258. – pp. 105134. DOI: 10.1016/j. enggeo. 2019.05.011
17. Lentas, K., Gkaraouni, C. G., Kalligeris, N., Melis N. S. The 30 October 2020, MW= 7.0, Samos earthquake: aftershock relocation, slip model, Coulomb stress evolution and estimation of shaking. // Bull Earthquake Eng. – 2022. – pp. 819-851. DOI: 10.1007/s10518-021-01260-4
18. Pasquale M., Srikrishnan S. S., Xuanmei F., Greco R. Changes in debris-flow susceptibility after the Wenchuan earthquake revealed by meteorological and hydro-meteorological thresholds. // Catena. – 2022. – Vol. 210. –pp. 105929. DOI: 10.1016/j. catena. 2021.105929
19. Scholz C. H. 2019. The Mechanics of Earthquakes and Faulting. // Cambridge University Press, Cambridge. – 493 p. DOI: 10.1017/9781316681473
20. Tang C., van Westen C. J. Atlas of Wenchuan-Earthquake Geohazards. // Science Press, Beijing. – 2018. – 96 p.

References

1. Aptikaeva O. I. Features of the 1976 and 2011 Van earthquakes, swarm seismicity and S-wave attenuation field. Geology of the South of Russia. 2019. Vol. 9 (3). pp 105-118. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36475 (in Russ.)

2. Gabsatarova I.P., Koroletsky L.N., Selivanova E.A., Artyomova E.V., Kamenskaya O.P. North Caucasus. Earthquakes of Northern Eurasia. 2019. No. 22. pp. 82-95. DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.07 (In Russ.)
3. Etirmishli G.D., Abdullaeva R.R., Ismailova S.S., Kazymova S.E. Azerbaijan. Earthquakes of Northern Eurasia. 2018. No. 21. pp. 59-66. (In Russ.)
4. 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 (4). pp. 70-82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006 (in Russ.)
5. Engineering support of measures and actions for the liquidation of emergency situations. Book. 2. Operational forecasting of the engineering situation in emergency incidents. S.K. Shoigu (ed.). Moscow. Papyrus. 1998. 166 p. (in Russ.)
6. Karavayev V.A., Seminozhenko S.S. The extreme geomorphologic processes cycle in the Balkar Cherek river basin. *Geomorphology*. 2016. No. 2. pp. 34-40. DOI: 10.15356/0435-4281-2016-2-34-40 (In Russ.)
7. Karavaev V.A., Fedin A.V., Seminozhenko S.S. A new cycle of dangerous processes in the highlands of the Central Caucasus. *Life of the Earth*. 2020. Vol. 42. No. 2. pp. 136-142. DOI: 10.29003/m1383.0514-7468.2020_42_2/136-142 (In Russ.)
8. Kesheva L.A., Teunova N.V. Changes in the temperature regime in various climatic zones of the Kabardino-Balkarian Republic. *Reports of the Adyghe (Circassian) International Academy of Sciences*. 2021. Vol. 21. No. 1. pp. 46-51. DOI: 10.47928/1726-9946-2021-21-1-46-51 (In Russ.)
9. Kurovskaya V.A., Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. Assessment of the quantitative characteristics of the mudflow in 2015 in the valley of the river. Barsemdara (Tajikistan) based on video materials and simulation results. *Georisk*. 2020. No. 3. pp. 8-11. DOI: 10.25296/1997-8669-2020-14-3-12-22 (In Russ.)
10. Makhinov A.N. A large landslide and the resulting tsunami in the Bureya reservoir. *Geomorphology*. 2020. No. 3. pp. 31-43. DOI: 10.31857/S0435428120030086 (In Russ.)
11. Rogozhin E.A., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Kanonidi K.Kh. About the devastating earthquake on the border between Iran and Iraq. *Geophysical processes and biosphere*. 2018. Vol. 17. No. 2. pp. 5-22. DOI: 10.21455/gpb2018.2-1 (In Russ.)
12. Stogny V.V., Zaalishvili V.B., Ponomareva N.L. Modern geodynamics and seismicity of the North Caucasus: problems of monitoring. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12 (2). pp 34-52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003 (in Russ.)
13. Tashilova A.A., Kesheva L.A., Teunova N.V. Analysis of the precipitation regime in the North Caucasus over the past 60 years. In: *Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus*. Moscow. IHST RAS. 2022. pp. 671-675. (in Russ.)
14. Ulomov V.I. Identification of potential sources and long-term forecast of strong earthquakes in the North Caucasus. In: *Environmental and climate change. Natural and related man-made disasters*. Vol. 1. Seismic processes and catastrophes. Ed.A. O. Gliko. Moscow. IPE RAS. 2008. pp. 127-146. (in Russ.)
15. Elliott J., Copley A., Holley R., Scharer K., Parsons B. The 2011 Mw 7.1 Van (Eastern Turkey) earthquake. *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2013. Vol. 118. pp. 1619-1637.
16. Horton A.J., HalesaT. C., Ouyang C., Xuanmei F. Identifying post-earthquake debris flow hazard using Massflow. *Engineering Geology*. 2019. Vol. 258. pp. 105134. DOI: 10.1016/j.enggeo. 2019.05.011
17. Lentas, K., Gkarlaouni, C. G., Kalligeris, N., Melis N.S. The 30 October 2020, MW=7.0, Samos earthquake: aftershock relocation, slip model, Coulomb stress evolution and estimation of shaking. *Bull Earthquake Eng.* 2022. pp. 819-851. DOI: 10.1007/s10518-021-01260-4
18. Pasquale M., Srikrishnan S.S., Xuanmei F., Greco R. Changes in debris-flow susceptibility after the Wenchuan earthquake revealed by meteorological and hydro-meteorological thresholds. *Catena*. 2022. Vol. 210. pp. 105929. DOI: 10.1016/j.catena. 2021.105929
19. Scholz C.H. 2019. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge University Press, Cambridge. 493 p. DOI: 10.1017/9781316681473
20. Tang C., van Westen C.J. *Atlas of Wenchuan-Earthquake Geohazards*. Science Press, Beijing. 2018. 96 p.

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

УДК 520.37

DOI: [10.46698/VNC.2022.35.95.002](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.35.95.002)

Original paper

Modern GPS geodynamics of Azerbaijan

G. J. Yetirmishli^{ID}, I. E. Kazimov^{ID}

Republican Seismic Survey Center, Azerbaijan National Academy of Sciences. 123 Guseyn
Javid Str., Baku AZ1001, Azerbaijan, e-mail: ilya_24@mail.ru

Received: 04.11.2022, revised: 03.12.2022, accepted: 09.12.2022

Abstract: The relevance. The article considers the monitoring of geodynamic deformations of the territory of Azerbaijan according to the data of GPS stations (Global Positioning System). The identification of changes in the velocities of tectonic blocks is the basis for the construction of geodynamic models that allow establishing a connection with the tectonic-geological structure of the region under study. **The aim** of the work was geodetic analysis and comparison of the results of GPS stations with the seismicity of the region under study, obtained for the period 2017-2021 on the territory of Azerbaijan. **Methods.** The article presents a method for calculating the velocity fields of modern horizontal displacements of the tectonic blocks of Azerbaijan, obtained from the results of observations at 24 GPS_RCSS stationary stations, a characteristic aspect of which is a noticeable horizontal displacement in the northeast direction at a rate of 4-12 mm/y. In the study, mainly two space-time modes were applied: calculation of the initial coordinates of the stations of the geodetic network and the calculation of the shear deformation compared to the original. In this article, the velocity field of tectonic blocks on the territory of Azerbaijan was studied based on the results of GPS measurements calculated using the GAMIT program (Global Navigation Satellite System (GNSS) at the Massachusetts Institute of Technology). Based on the results calculated using the GAMIT (Global Navigation Satellite System (GNSS)) program, the velocities of individual tectonic structures within the study region were obtained. **Results.** To identify the gradient zones of velocity change, the azimuthal directions of the velocity vectors of the horizontal movements of the territories of Turkey and Iran, obtained on the UNAVCO website (a consortium of the NAVSTAR University), were also taken into account. **Work results.** Thus, it was obtained that along the central part and in the southwest of the country, in the Nakhchivan Autonomous Republic and the border regions of Iran, compression oriented to the NE prevails. The maximum value of the strain rate throughout the territory of Azerbaijan fluctuates within 17 mm/y. Analysis of the velocity field also showed low velocity values in the Greater Caucasus (4-6 mm/y). In addition, a correlation analysis of the value of velocities with the seismic activity of the region was carried out. It is concluded that there is a certain relationship between the change in velocity of horizontal displacement of blocks and the distribution of strong earthquakes in the field of the rate of deformation of the earth's crust. At GPS stations Nardaran (NRDG), Gobu, Gala (GALG) and Jiloy Island (JLVG), which enter the Absheron zone, are tracked almost the same as the values of horizontal displacements of 4.7, 4.0, 5.0, 4.9 mm / year respectively). In the direction of the Talysh region up to the Absheron Peninsula (in the direction of SW-NE) there is a noticeable decrease in the northern components change in the rate of displacements compared to the values of the (LKRГ=14.9 mm/y, GLBG=19.8 mm/y, YRDG= 13.0 mm/y).

Keywords: GPS stations, geodynamics, horizontal displacement velocity fields, plate tectonics.

For citation: Yetirmishli G. J., Kazimov I. E. Modern GPS geodynamics of Azerbaijan. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (4): 19-30. DOI: 10.46698/VNC.2022.35.95.002/

ГЕОТЕКТНИКА И ГЕОДИНАМИКА

DOI: [10.46698/VNC.2022.35.95.002](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.35.95.002)

Оригинальная статья

Современная GPS-геодинамика Азербайджана

Г. Д. Етирмишли , И. Э. Казымов 

Республиканский центр сейсмологической службы, Национальная академия наук
Азербайджана, Республика Азербайджан, AZ1001,
г. Баку, ул. Г. Джавида, 123, e-mail: ilya_24@mail.ru

Статья поступила: 04.11.2022, доработана: 03.12.2022, принята к публикации: 09.12.2022

Резюме: Актуальность работы. В статье рассмотрен мониторинг геодинамических деформаций территории Азербайджана по данным GPS-станций (Global Positioning System). Выявление изменения значений скоростей тектонических блоков является основой для построения геодинамических моделей, позволяющей устанавливать связь с тектоно-геологическим строением исследуемого региона. **Целью работы** был геодезический анализ и сравнение результатов станций GPS с сейсмичностью исследуемого региона, полученных за период 2017-2021 гг. на территории Азербайджана. **Методы исследования.** В статье представлена методика расчета полей скоростей современных горизонтальных смещений тектонических блоков Азербайджана, полученных по результатам наблюдений на 24 стационарных станциях GPS_RCSS, характерным аспектом которых является заметное горизонтальное смещение в северо-восточном направлении со скоростью 4-12 мм/год. В процессе изучения геодинамических процессов с помощью GPS-технологий в основном используются два пространственно-временных режима: однократное переопределение начальных координат точек геодезических сетей и смещение начальных значений деформаций. В данной статье изучено поле скоростей тектонических блоков на территории Азербайджана по результатам GPS измерений, рассчитанных по программе GAMIT (Global Navigation Satellite System (GNSS) в Массачусетском технологическом институте). По результатам вычисленных на программе GAMIT (GNSS) были получены значения скоростей отдельных тектонических структур в пределах исследуемого региона. Для выявления градиентных зон смены скоростей, также учитывались азимутальные направления векторов скоростей горизонтальных движений территорий Турции и Ирана, полученные на сайте UNAVCO (консорциум Университета NAVSTAR). **Результаты работы.** Таким образом, было получено, что вдоль центральной части и на ЮЗ страны, в Нахичеванской АР и приграничных районах Ирана преобладает сжатие, ориентированное на СВ. Максимальное значение скорости деформации на всей территории Азербайджана колеблется в пределах 17 мм/год. Анализ поля скоростей также показал низкие значения скоростей на Большом Кавказе (4-6 мм/год). Кроме того, был проведен корреляционный анализ значений скоростей с сейсмической активностью региона. Сделан вывод о наличии определенной связи между изменением значений скоростей горизонтальных движений и распределением сильных землетрясений поля скорости деформации земной коры. На GPS-станциях Нардаран (NRDG), Гобу, Гала (GALG) и острове Жилой (JLVG), входящих в Абшеронскую зону, отслеживаются практически одинаковые значения горизонтальных перемещений 4,7, 4,0, 5,0, 4,9 мм/г. соответственно. В направлении Талышского района вплоть до Абшеронского полуострова (в направлении ЮЗ-СВ) наблюдается заметное уменьшение северной составляющей изменения скорости перемещений по сравнению со значениями (LKPG= 14,9 мм/год, GLBG=19,8 мм/год, YRDG= 13,0 мм/год).

Ключевые слова: GPS-станции, геодинамика, поля скоростей горизонтальных перемещений, тектоника плит.

Для цитирования: Етирмишли Г. Д., Казымов И. Э. Современная GPS-геодинамика Азербайджана. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (4): 19-30. DOI: 10.46698/VNC.2022.35.95.002/

Introduction

As you know, Azerbaijan is part of the Alpine-Himalayan mountain belt, formed in the Cenozoic on the southern margin of the East European platform as a result of a collision between the Eurasian and Scythian plates, which has experienced rapid uplift over the past five million years. The advance of the Scythian Plate to the north is partially offset by the displacement of the Anatolian block to the west. The tectonics of this vast region is mainly determined by the collision of the Arabian and African plates with the Eurasian plate [Milyukov et al., 2015; Reilinger et al., 2006; Robertson et al., 1996; Tapponnier et al., 2001]. Regionally, the region under study includes three tectonic blocks of the Alpine fold system: the Deshte-Lut block, located in the east of Iran, the Turan Plate, located on the eastern coast of the Middle Caspian, and the Bitlis-Zagros Thrust, located in southwestern Iran. These large geoblocks are surrounded by the main geostructural elements of Azerbaijan [McKenzie, 1972, 1978]. A huge meridional depression of the Caspian Sea adjoins Azerbaijan from the east. The northern part of the republic is covered by the eastern segment of the complex southern wing of the meganticlinoria of the Greater Caucasus [Mahmoud et al., 2005, 2006; Rogozhin et al., 2015, 2018; Shempelev et al., 2017; Stogny et al., 2022; Zaalishvili et al., 2016, 2018]. The meganticlinorium of the Lesser Caucasus and the Talysh region are located in the southern and southwestern parts of the republic. In the geodynamic aspect, the Taysh region is characterized by high seismic activity and high horizontal slip rates. The Lesser Caucasus region is also characterized by increased velocities at GPS stations, but in recent years the level of seismic activity has been moderate. The results of the global positioning system (GPS) allowed us to get a new perspective and the ability to monitor the movements of blocks and trace the deformations of the earth's crust.

Materials and Methods

All calculations were made using the GAMIT program, which is a universal package for analyzing GPS data. Although the software is currently maintained by three authors, many other people have also contributed to the development of this program. High-precision geodetic surveys using space satellites work on the basis of the phase of the carrier wave, which is the product of a single phase channel of the GPS receiver. These calculations include an analysis of the difference between the phase of the satellite signal and the phase at the station. To obtain reliable and accurate data, it is necessary to analyze data from both several stations and several satellites simultaneously [Jackson et al., 1984].

The GAMIT program includes separating algorithms that map the phase of the carrier wave into first and second phase differences. The calculation of one-way phases relative to the station clock is performed using the -autcln program. This program is used to estimate atmospheric and ionospheric errors [Herring et al., 2010].

The range measurements, together with the station and satellite coordinates, are used to determine the station clock offset within a microsecond, which is sufficient to ensure that the calculation error does not exceed 1 mm.

Using the least squares method for space satellites, reference orbits are created, according to which the errors between the observed and calculated values of the partial derivatives of the geometric model are revealed. It should be noted that in 2012, the installation of a new network of GPS stations began at the RSSC under ANAS. A total of 24 stations were installed. Geodetic coordinates are processed on the AUSPOS server (Australia) [Herring et al., 2003].

To estimate the speeds of the determined stations, 8 closely located reference stations of the IGS network were used: ARTU (Arti, Russia), CRAQ (Simeiz, Ukraine), DRAG (Metzoke, Israel), POLV (Poltava, Ukraine), MDVJ (Mendeleevo, Russia) ANKR (Ankara, Turkey) NICO (Nicosia, Cyprus), POL2 (Bishkek, Kyrgyzstan). The selected ref-

Table 1.

**Parameters of the world reference stations of the IGS network
(compiled by the authors)**

Code	Region	Country	Lat ϕ°	Lon λ°	Receiver	Antenna	Register satellites
ANKR	Ankara	Turkey	39,88	32,75	LEICA GR30	LEIAR10 + NONE	GPS GLO-NASS Galileo BeiDou SBAS
ARTU	Arty	Russia	56,43	58,56	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M + DOME	GPS
CRAO	Simeiz	Ukraine	44,41	33,99	ASHTECH UZ-12	ASH701945C_M + SCIS	GPS
DRAG	Metzoke, Israel	Israel	31,59	35,39	JAVAD TRE_3 DELTA	ASH700936D_M + SNOW	GPS GLO-NASS
MDVJ	Mendelevo	Russia	56.02	37.21	TPS NETG3	JPSREGANT_DD_E1 + NONE	GPS GLO-NASS
NICO	Nicosia	Cyprus	35,14	33,4	LEICA GR25	LEIAR25. R4 + LEIT	GPS GLO-NASS Galileo BeiDou SBAS
POL2	Bishkek	Kyrgyzstan	42,68	74,69	ASHTECH UZ-12	TPSCR. G3 + NONE	GPS
POLV	Poltava	Ukraine	49,6	34,54	LEICA GR10	LEIAR10 + NONE	GPS GLO-NASS Galileo

reference stations with the indicated coding are included in the implementation of the international terrestrial reference frame ITRF2008 [Kazimova, Kazimov, 2020]. Table 1 shows the coordinates, international code, type of equipment and registered satellites of reference stations.

Seismicity of the territory of Azerbaijan in 2017-2021 yy.

Seismicity of the territory of Azerbaijan in 2017-2021, seismic analysis of the territory of Azerbaijan have been conducted on the basis of 40 digital data (Annual report on the results of scientific and production work of the seismology department of the Republican Seismic Survey Center of Azerbaijan National Academy of Sciences. Fund of Materials of ANAS. Baku. 2017). During the 2019 year, 13,818 earthquakes were recorded by RSSC. Of these, 5442 are local (Azerbaijani territory), 1825 regional and 2188 remote earthquakes. At the same time, 2948 weak shocks (recorded by a single station), 1405 explosions, 7 landslides and 3 volcanoes were recorded. The map of the earthquakes epicenters for 2017-2021 with $m_l > 3.0$ in Azerbaijani territory has been created (fig. 1).

As can be seen from this map, the vast majority of tangible earthquake sources are located at the junction zone of the Kura Plain and the southern slope of the Greater Caucasus. In 2019, 81 earthquakes with a magnitude of $m_l \geq 3.0$ were recorded in the territory of Azerbaijan and 25 of them are tangible earthquakes. Compared to 2018, the number of earthquakes in 2019 has increased and the amount of released seismic energy has decreased (Annual report of RSSC ANAS, 2018); Yetirmishli et al., 2019]. Thus, the num-

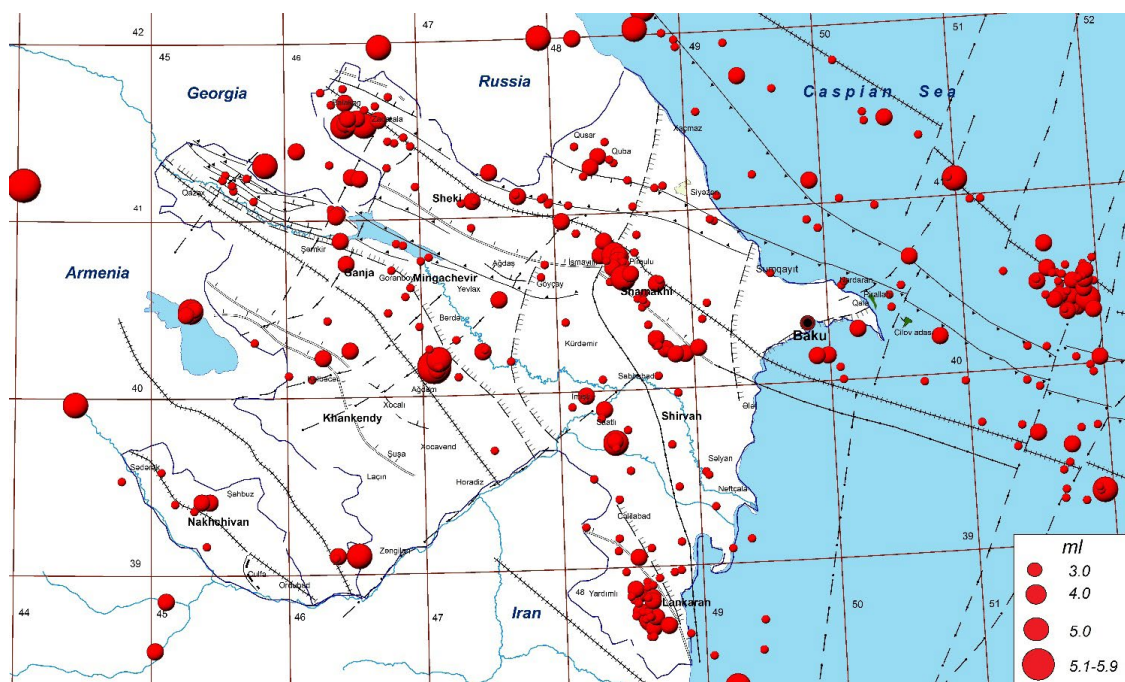


Fig. 1. Map of earthquake epicenters in Azerbaijan and adjacent regions for 2017-2021
(Compiled by the authors)

ber of earthquakes was 4081 in the territory of Azerbaijan in 2018, the amount of released seismic energy $\sum E = 42.7 \cdot 10^{11}$, the maximum magnitude 5.5, the number of earthquakes was 5442 in 2019, the amount of released seismic energy $\sum E = 31.9 \cdot 10^{11}$ J, the maximum magnitude 5.2. Compared to 2019, the number of earthquakes and the amount of seismic energy released in 2020 decreased (Annual report of RSSC ANAS, 2019).

Analysis of the number of earthquakes in Azerbaijan and adjacent areas and the distribution of seismic energy by months shows that in 2020, seismic energy was higher in February, April and June. This is due to earthquakes of magnitude 5.9 on the Turkish-Iranian border. Let's note that, $m_l = 6.4$ earthquake was registered on February 23, 110 km south-west of Nakhchivan station on the Turkish-Iranian border. In February and March 2020, the number of earthquakes was higher than in other months. This is due to the aftershocks of an earthquake with a magnitude of $m_l = 5.9$. During 2021, 15,599 earthquakes were registered (Annual report of RSSC ANAS, 2020). Of them, 4173 are local (Azerbaijani territory), 4059 regional and 3346 remote earthquakes. In addition, 5 volcanoes, weak 2599 tremors (recorded by a single station), 1417 eruptions were recorded. 63 and 17 tremors with a magnitude of 3 were recorded in Azerbaijan. The number of earthquakes and the distribution of seismic energy within the country in 2010-2021, the number of earthquakes within the considered region in 2020 is 4030, the amount of seismic energy is $\sum E = 13.1 \cdot 10^{11}$ J, the maximum magnitude is $m_l = 4.9$. In 2021, the number of earthquakes was 4173, the amount of seismic energy released was $\sum E = 14.3 \cdot 10^{11}$ J, and the maximum magnitude was $m_l = 5.1$ (Annual report of RSSC ANAS, 2020). Seismicity monitoring over the past 15 years has revealed an increase in activity from year to year, reaching its maximum in 2012, when a number of strong earthquakes ($m_l = 5.0-5.7$) were registered in the northern part of the republic. This is due to the strong ($m_l = 4.0-5.7$) earthquakes in the country. In 2012, the amount of seismic energy released increased 25 times compared to 2011. The amount of seismic energy released in 2013 decreased by about 28 times compared to 2012. It should be noted that the sharp increase in the number of earthquakes in 2010 compared to previous years is associated with an increase in the

number of seismic stations in the region. As noted earlier, high activity was also observed in 2014, 2016, 2017 and 2019, associated with strong earthquakes in the Hajigabul, Aghdam, Saatli and Ismayilli regions (Annual report of RSSC ANAS, 2021).

Analysis of the number of earthquakes in Azerbaijan and adjacent areas and the distribution of seismic energy by months shows that in 2021, seismic energy was higher in February and November. The high energy level in November was due to an earthquake of magnitude 5.1 in Shamakhi. In February 2021, the high level of seismic energy is due to earthquakes of ≤ 5.5 ml in Armenia (Annual report of RSSC ANAS, 2021).

Geodynamics of the territory of Azerbaijan in 2017-2021 on the basis of GPS data

Based on the foregoing, the directions of the velocities of horizontal movements for 2017-2021 were studied. Analysis of the data showed that in the Greater and Lesser Caucasus in 2017, the deformation of the northwestern displacement prevailed with a speed of 1.0-2 mm higher compared to the previous year. The central part of the region was characterized by an increase in strain values by 1.5-2.5 mm. The station located in the Caspian Sea on Zhiloy Island is characterized by low average annual values (2-3 mm) (Fig. 2). The analysis of station data showed that the values of deformations increased by 1-2 mm/year compared to the previous year.

A map of the epicenters of strong ($m > 4.0$) earthquakes that occurred in 2017 was constructed in order to reveal the relationship of horizontal movements with the geodynamic conditions of prices. GPS stations and the directions of the faults built by Shikhalibeyli are added to this map.

In addition, it was found that in 2017 in the Gusar, Saatli, Shirvan and Talysh regions, the rate of deformation was maximum. In addition, comparing the data of the GPS stations with the seismic activity of that year, it can be seen that these regions were characterized by activity. An analysis of the source mechanisms also showed here the predominance of left-lateral strike slips in the NE direction, at medium depths, corresponding mainly to the granite layer. In 2017, at 03:25, an earthquake with a magnitude of 5.4 was recorded in the Lower Kura depression at a depth of 48 km. Note that in 2017, the velocity at Saatli station increased to 14.7 mm/yr. Note that this station was installed on an ultra-deep well. In 2018, the strain rate at this station dropped to 9.6 mm/year (Fig. 3).

In 2018, activation was observed in the Zakatala and Lerik regions. The earthquake that occurred in the northwest starny in the Zakatala region at the epicenter was felt up to

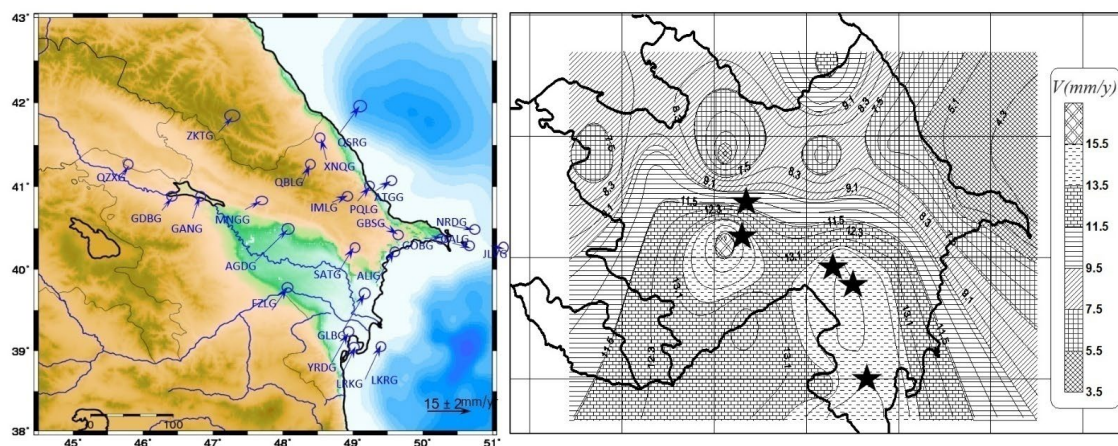


Fig. 2. Map of horizontal velocities obtained in the GAMIT program for GPS stations for 2017
(Compiled by the authors)

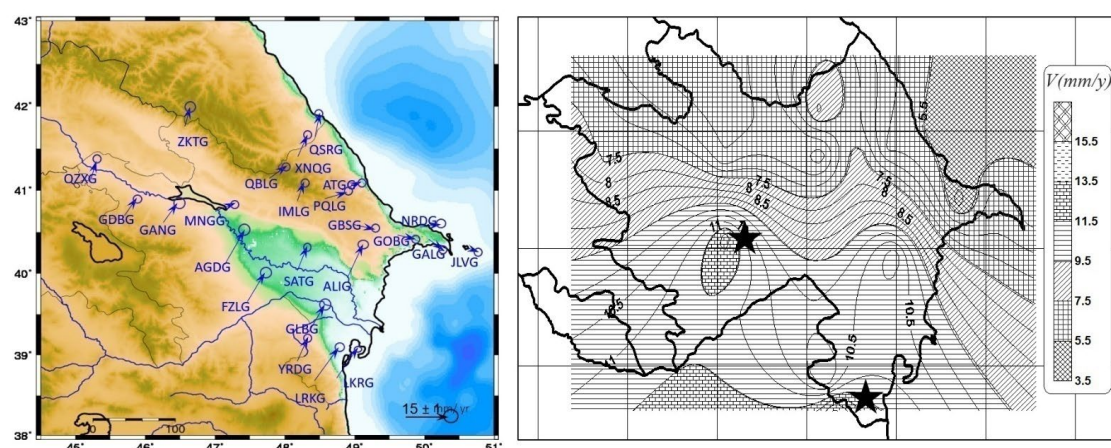


Fig. 3. Map of horizontal velocities obtained in the GAMIT program for GPS stations for 2018
(Compiled by the authors)

6 points (with magnitude $m_l = 5.5$). It should be noted that the focus of this earthquake coincided with the focus of the strong Zagatala earthquake, which occurred in May 2012 [Yetirmishli et al., 2018]. The earthquake that occurred in the Talysh region (Lyankaran) was felt in the focus up to 5 points. Note that in 2018, the velocity values at the Lerik GPS station increased to 13.2 mm/year.

In 2019, the average value of the strain rate in the Greater Caucasus was characterized by values equal to 3.1-9.6 mm/year, in the central part of the region, in the area of depression 6.9-16.5 mm/year, in the south of the country 10.2-14.8 mm/year, and for stations located on the Caspian coast, the values varied within 3.6-4.8 mm/year. It can be noted that in 2019, for the territory of Azerbaijan, the average value of deformations was 8.4 mm/g in the direction of NE. The analysis of seismicity in 2019 showed a strong earthquake that occurred in the Agsu region with a magnitude of $m_l = 5.2$. The earthquake was so palpable that landslide processes and the eruption of a mud volcano located 10 km SE from the source were subsequently observed. In addition, it can be noted that throughout all these years, the Caspian Sea region was also characterized by high activity.

Based on the data obtained in 2021, north-eastern movements are observed for the territory of Azerbaijan on average up to 5.4 mm/y per year. It was determined that in 2021, the average value in the Greater Caucasus will be 3.49 mm/y, in the Lesser Caucasus 4.80 mm/y, in the Middle and Lower Kura Basin 6.95 mm/y, in Talysh 10.58 mm/y, in the Apsheron Peninsula 2.80 mm/y velocities are set. Also, the values of displacement at the station located on Gilov Island in the Caspian Sea were set at 1.6 mm. In 2021, the highest speeds were observed at Yardimli (12 mm/y), Lankaran (11.90 mm/y) and Saatli (12.0 mm/y) stations. It should be noted that in general, compared to the data of 2020, in 2021 the prices of speeds decreased. Mainly at Aghdam, Ganja, Lerik and Gazakh stations (Fig. 4).

Results

Using the data of the GPS stations of the RSSC of ANAS, UNAVCO, Turkey and Iran [Kadirov et al., 2015], a map of the vectors of azimuthal motions and a diagram of the velocities of the horizontal motions of the blocks of the study region were constructed (Fig. 5,6). It should be noted that since 2013, a new monitoring system has been installed on the territory of Azerbaijan within the framework of the RSSC, consisting of 24 GPS stations from Trimble (USA).

An analysis of the velocity field of GPS stations showed the heterogeneity of deformation processes in the region of the Eastern Mediterranean and the Caucasus. The

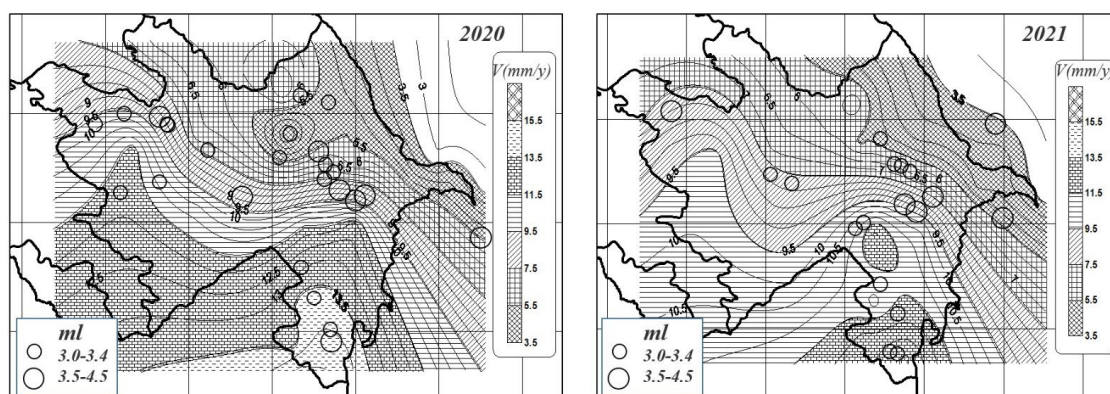


Fig. 4. Comparative maps of horizontal velocities obtained in the GAMIT program for GPS stations for 2020-2021 (Compiled by the authors)

considered results show the movement of the Scythian plate relative to the Eurasian one. Considering the speeds of movement of the Anatolian and Eurasian plates, and the Scythian and Anatolian plates, it was found that the shear rate along the North Anatolian fault turned out to be 20 mm/g, along the East Anatolian – 14 mm/year. This testifies to the convergence of the Anatolian and Eurasian plates through the system of right-hand strike-slip faults in eastern Turkey and the Thrust system in the Caucasus. The total reduction in the distance between the Lesser and Greater Caucasus is 10 mm/yr.

According to modern data of GPS measurements, Western Zagros at a rate of $\sim 10 \pm 2$ mm/y in the direction of $12-8 \pm 2$ mm/y in the direction $7 \pm 5^\circ$ north – northeast. The difference in crushing rates is most likely due to a significant amount of shear deformation

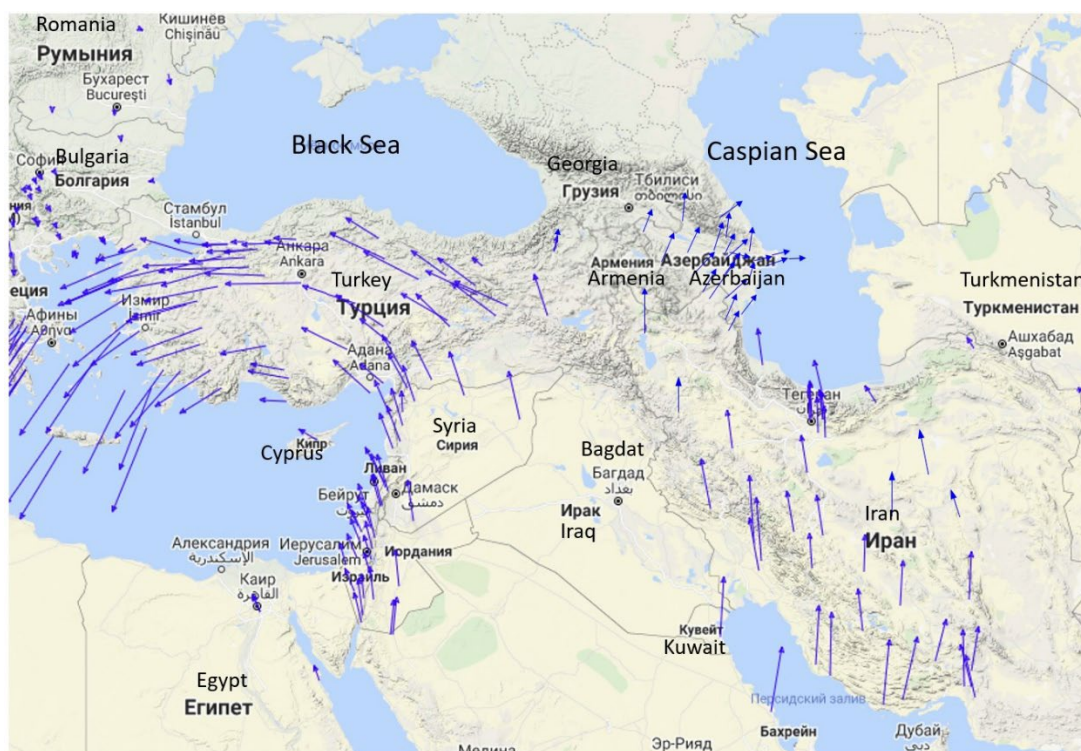


Fig. 5. Azimuth map of GPS station vectors in the Mediterranean region according to the RSSC data at ANAS, UNAVCO, Turkey and Iran (Compiled by the authors)

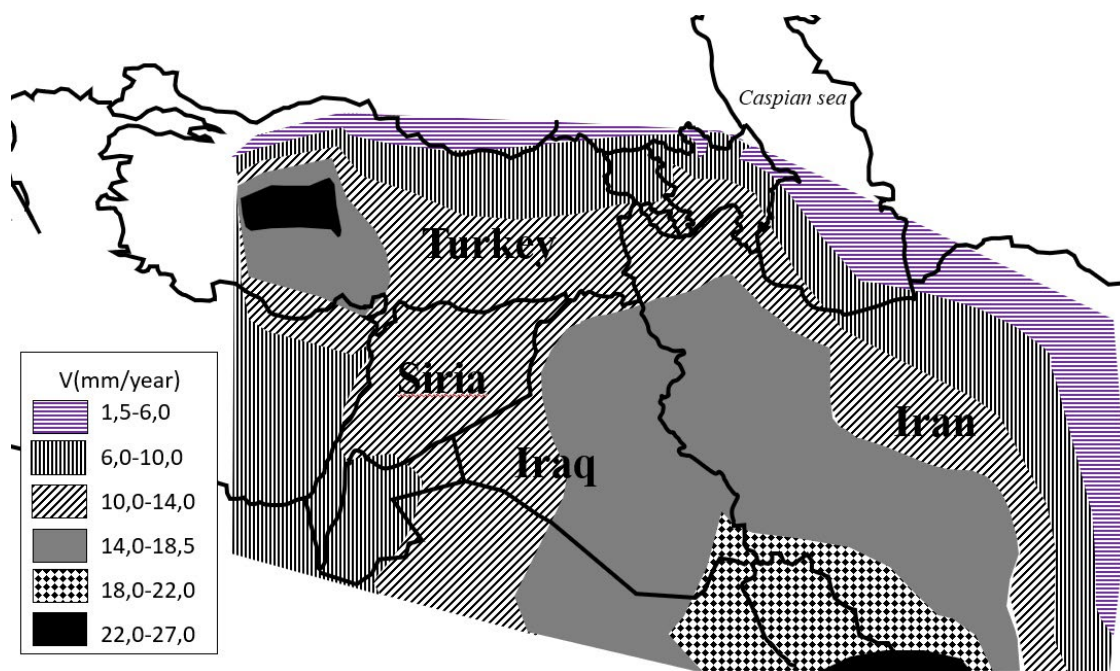


Fig. 6. Distribution of velocities of horizontal movements of the Mediterranean region according to GPS station data for the period 2006-2020 (Compiled by the authors)

along the Main Modern Fault MRF in the Northwestern Zagros [Conrad, Lithgow-Bertelloni, 2004]. The velocity field of GPS observations within the Caucasus region clearly illustrates the movement of the earth's crust in the N-NE direction on the territory of Azerbaijan and adjacent regions of the Lesser Caucasus relative to Eurasia [Kadirov et al., 2015].

On the graph of changes in speed values over the years, for each GPS station, the regions where they are located were identified. As seen in fig. 7 the minimum values are noted on the Apsheron peninsula. The maximum values are identified in the Lesser Caucasus and in the territory of Talysh. From this we can conclude that under the pressure of the Arabian Plate and the Iranian block, the Lesser Caucasus is moving towards the Kura depression at an average speed of 12 mm/y, thereby causing a compression zone. Taking into account the fact that the zone of the Greater Caucasus moves to the NE at an

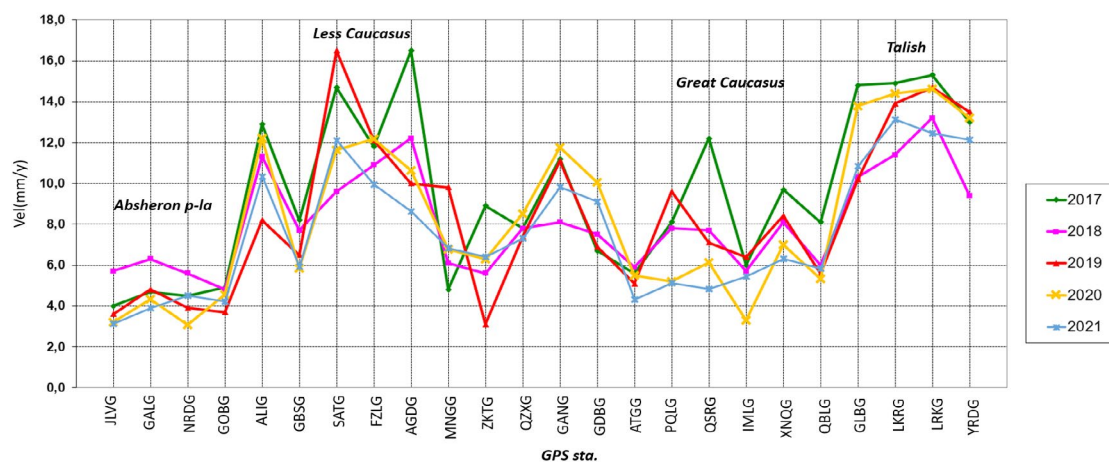


Fig. 7. Graph of changes in speed values over the years for each GPS station (Compiled by the authors)

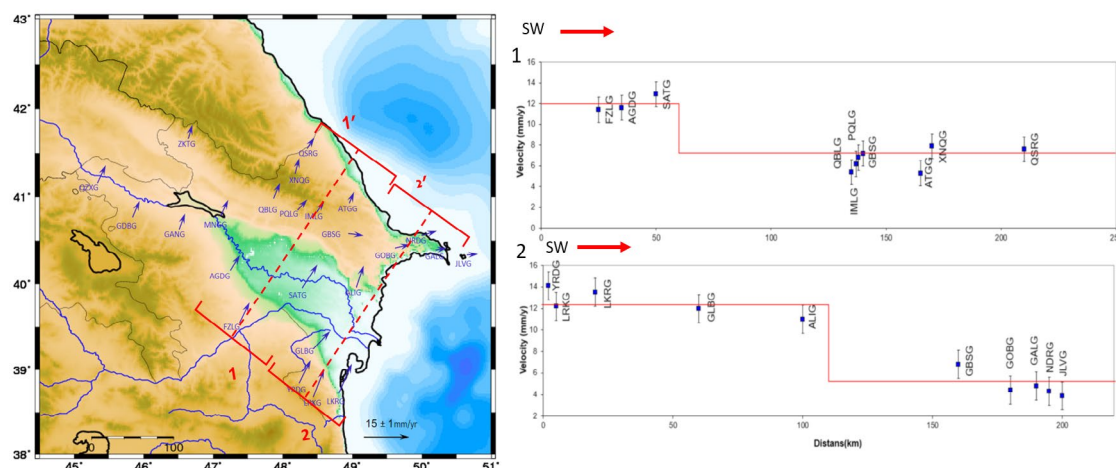


Fig. 8. Maps and profiles of average values of horizontal velocities obtained in the GAMIT program for GPS stations for 2017-2021 yy. (Compiled by the authors)

average speed of 4 mm/y, the Kura depression, in turn, moves at an average speed of 8 mm/y under the Greater Caucasus, thereby forming a thrust zone or a subduction zone [Aktug et al., 2009, 2013].

In order to monitor the change of velocities depending on the different regions, two profiles were constructed, 1-1 and 2-2 in the direction of SW-NE (Fig. 8).

Profile 1-1 is built on 7 stations. As can be seen from the profile, the values of velocities in the Lesser Caucasus are 12.0 and 10.2, while in the Greater Caucasus they are 6-8 mm/y. An interesting picture is observed when considering the profile 2-2, oriented to the NE, in cross strikes, through the Talysh region to the Caspian Sea (Fig. 8). It can be seen from the figure that if the values of velocities located at the Absheron in comparison with the Talysh stations decrease by two or even three times, the values of azimuth angles increase by three times.

That is, there is a shift of horizontal deformations on the Absheron Peninsula from NE to NE. An important role here is played by orthogonal faults separating Talysh from Absheron and, of course, the influence of the Arabian plate and the Iranian micro block. Under the pressure of these tectonic structures, a kind of clockwise turn towards the Caspian Sea is observed. It can be assumed that the Talysh region, being a single plate, is moving to the NE, and Absheron, being part of another plate, is moving to the east.

Thus, based on the data obtained in 2017-2021, up to 8.4 mm/y in the north-northeast direction was observed for the territory of Azerbaijan. As the analysis shows the distribution of velocity, the mean values of the horizontal displacement points in the north and east are not constant, nor are the processes of shortening the surface of the earth's crust in the region of study.

It was determined that on the territory of the Kura lowland in the direction from the Middle-Kura depression to the Low-Kura depression (i. e. from NE to SW) there is a gradual increase in the rates of horizontal movements from 7.3 to 11.3 mm/y, which in turn creates a stretching condition. It can be noted that in the last few years the territory of the Middle and Lower Kura depressions has increased significantly. Several earthquakes with $M > 5$ were observed along the Kura, West Caspian and Palmir-Absheron tectonic faults.

Conclusion

Thus, summarizing the results of the study, it may be argued that a drop in the values of the velocities of horizontal movements by almost a factor of two is observed in the

cross of the strike of the Greater and Lesser Caucasus, which indicates the thrusting of the Lesser Caucasus onto the Kura depression at a rate of 10-12 mm/y and the gradual underthrusting of the Kura depression under the Greater Caucasus.

At GPS stations Nardaran (NRDG), Gobu, Gala (GALG) and Jiloy Island (JLVG), which enter the Absheron zone, are tracked almost the same as the values of horizontal displacements of 4.7 mm/y, 4.0 mm/y, 4.0 mm/y, 5.0 mm/y, 4.9 mm/y respectively. In the direction of the Talysh region up to the Absheron Peninsula (in the direction of SW-NE) there is a noticeable decrease in the northern components change in the rate of displacements compared to the values of the (LKRG= 14.9 mm/y, GLBG=19.8 mm/y, YRDG= 13.0 mm/y). It can be argued that in 2018 in the Talysh region there was a strong tremor with a magnitude of 5.3. In addition, there is a noticeable increase in the azimuthal angles of the Absheron stations, indicating the movement of the clockwise direction in the direction of east-south-east to 140°.

Summing up the research, it can be concluded that methods of satellite geodesy for observations of the process of movement of the Earth's surface allows us to conduct research at a higher level. The results obtained can be used in studying the movement of lithospheric plates; and clarification of the boundaries of individual blocks. By correlating the received data with seismic data, one can also determine the expected depth of a particular block. Relying on the results of seismic analysis in the territory of Azerbaijan, the Shamakhi-Ismaili, Saatli, Gazakh, Caspian and Zagatala seismogenic zones are identified, which are confined to the gradient zones of the deformation rate field of the Earth's crust.

Referenses

1. Aktug B., Parmaksız E., Kurt M., Lenk O., Kılıçoglu A., Gurdal M.A., Ozdemir S. Deformation of Central Anatolia: GPS implications. *J. Geodyn.* 2013. Vol. 67. pp. 78-96.
2. Aktug B., Nocquet J.M., Cingöz A., Parsons B., Erkan Y., England P., Lenk O., Gurdal M.A., Kilicoglu A., Akdeniz H., Tekgül A. Deformation of western Turkey from a combination of permanent and campaign GPS data: limits to block-like behavior. *J. Geophys. Res. Solid Earth.*, 2009. Vol. 114. B10404.
3. Conrad C.P., Lithgow-Bertelloni C. The temporal evolution of plate driving forces: Importance of "slab suction" versus "slab pull" during the Cenozoic. *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109. Is. B10407.
4. Herring T.A. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program Version 10.1 Internal Memorandum, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2003. Vol. 20.
5. Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. Introduction to GAMIT/GLOBK. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, 2010. 48 p.
6. Jackson J., McKenzie D. Active tectonics of the Alpine – Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1984. Vol. 77. pp. 185-264.
7. Kadirov F.K., Floyd M., Rueinger R., Alizadeh Ak.A., Guliyev I., Mammadov S.G., Safarov R.T. Active geodynamics of the Caucasus region: implications for earthquake hazards in Azerbaijan. *Proceedings of Azerbaijan National Academy of Sciences. The Sciences of Earth*, 2015. Vol. 3. pp. 3-17.
8. Kadyrov F.A., Mamedov S.K., Safarov R.T. The study of the current geodynamic situation and the danger of earthquakes deformation of the earth's crust in Azerbaijan using 5-year GPS data. Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Obninsk, GS RAS, 2015. pp. 156-162. (In Russ.)
9. Kazimova S.E., Kazimov I.E. Geodynamics of the Talish region according to earthquake source mechanisms and GPS stations. *Geology and Geophysics of the South of Russia*, 2020. Vol. 10 (3). pp. 40-56. DOI: 10.46698/VNC.2020.35.39.003

10. Mahmoud S., Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Tealeb A. GPS evidence for northward motion of the Sinai Block: implications for E. Mediterranean tectonics. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2005. Vol. 238. pp. 217-224.
11. Mahmoud S., Sakr K., ArRajehi A., Paradissis D., AlAydrus A., Prilepin M., Guseva T., Evren E., Dmitrotsa A., Filikov S. V., Gomez F., AlGhazzi R., Gebran Karam. GPS constraints on continental deformation in the Africa Arabia Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *J. Geophys. Res.*, 2006. Vol. 111. Is. B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051.
12. McKenzie D. Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions. *Geophys. J. Int.*, 1978. Vol. 55. pp. 217-254.
13. McKenzie D. Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophys. J. Int.*, 1972. Vol. 30. pp. 109-185.
14. Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A. Steblov G.M. Velocities of Recent Movements of the Northern Caucasus Estimated from GPS Observations. *Geotectonics*, 2015. No. 3. pp. 56-65.
15. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliev I., Stepanyan R., Nadariya M., Hahubia G. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *J. Geophys. Res. Solid. Earth.* 2006. DOI: 10.1029/2005JB004051
16. Robertson A., Mountrakis D. Tectonic Development of the Eastern Mediterranean Region. *Geol. Soci. London Spec. Publ.*, 1996. Vol. 260. pp. 1-9.
17. Rogozhin E. A., Milukov V.K., Mironov A.P., Ovsyuchenko A.N., Gorbatikov A.V. Characteristics of modern horizontal movements in the central sector of the greater Caucasus according to GPS observations data and their relationship with the newest tectonics and deep structure of the crust. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2018. – No. 4. pp. 141-148. (In Russ.)
18. Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Zaalishvili V.B., Stepanova M.Y., Andreeva N.V., Kharazova, Y.V. New data on the deep structure, tectonics, and geodynamics of the Greater Caucasus. *Doklady Earth Sciences*. 2015. Vol. 462 (1). pp. 543-545. DOI: 10.1134/S1028334X15050244
19. Shempelev A.G., Zaalishvili V.B., Kukhmazov S.U. Deep structure of the western part of the Central Caucasus from geophysical data. *Geotectonics*. 2017. Vol. 51 (5). pp. 479-488. DOI: 10.1134/S0016852117050053
20. Stogny V.V., Zaalishvili V.B., Ponomareva N.L. Modern geodynamics and seismicity of the North Caucasus: problems of monitoring. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12 (2). pp. 35-52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003 (In Russ.)
21. Tapponnier P., Zhiqin X., Roger F., Meyer B., Arnaud N., Wittlinger G., Jingsui Y. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 2001. Vol. 294. Is. 5547. pp. 1671-1677. DOI: 10.1126/science. 105978
22. Yetirmishli G. J., Ismayilova S. S., Kazimova S. E. Seismicity of the territory of Azerbaijan in 2019. *Seismoprognois observations in the territory of Azerbaijan*, 2021. Vol. 19. No. 1. pp. 3-18.
23. Yetirmishli G. J., Rzaev A. G., Kazimov I. E., Kazimova S. E. Modeling of the geodynamic situation of the Kura depression based on the latest seismological, geodetic and magnetometric data. *Bulletin of the Orenburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. No.. pp. 1-11. DOI: 10.24411/2304-9081-2018-12008
24. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Morozov F.S., Tuaev G.E. Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center. *International Journal of GEOMATE*. 2018. Vol. 15 (47). pp. 158-163. DOI: 10.21660/2018.47.20218
25. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A. S., Dzeranov B.V., Shepelev V.D. Application of microseismic and calculational techniques in engineering-geological zonation. *International Journal of GEOMATE*. 2016. Vol. 10 (1). pp. 1670-1674.

ГЕОТЕКТНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК 551.248.2

DOI: [10.46698/VNC.2022.75.43.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.75.43.003)

Оригинальная статья

Структурно-геодинамические исследования южного склона Большого Кавказа в районе Двалетского поднятия в связи с оценкой зон нарушений

В. М. Макеев , М. О. Ревазов , А. Г. Болотаева 

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

Статья поступила: 27.10.2022, доработана: 17.11.2022, одобрена в печать: 22.11.2022

Резюме: Актуальность работы связана с определением геодинамических условий формирования зон нарушений для обеспечения безопасности территорий инженерных сооружений. Эти зоны не всегда уточняются в аспекте их геодинамического происхождения и развития, что сказывается на реальной оценке территорий, в т. ч. в связи с землетрясениями и опасными экзогенными геологическими процессами. **Цель исследований** – структурно-геодинамические исследования в связи с оценкой пространственного распределения зон нарушений и особенностей современного развития. **Метод исследований** – структурно-геодинамический, включающий литологический (структурно-вещественный), структурно-геоморфологический, геодинамический (структурно-кинематический) и дистанционный. **Результатом работ** является выявление форм и типов рельефа, тектонических структур и интенсивных экзогенных процессов (селей, лавин и оползней), как показателей активности зон нарушений. Были установлены новейшие поднятия, прогибы и исследованы зоны нарушений (дислокации). По морфологии и возрасту разноранговые структуры не согласуются друг с другом, что может указывать на их разнотипность по напряженному состоянию и происхождению. Двалетское и Мтиулетское поднятия рассматриваются как новейшие антиклинали, формирующиеся в условиях напряжений сжатия. В приповерхностных условиях они подвергаются воздействию напряжений растяжения, возможно, в связи с ростом поднятий и нахождением на южном крыле сводового поднятия Большого Кавказа. В осевой части Главного Кавказского хребта в районе Двалетского поднятия исследованы локальные разрывные зоны – взбросы в юрско-нижнемеловом флише. Они являются активизированными преимущественно в условиях напряжений растяжения. Это подтверждается результатами полевых наблюдений – к ним приурочены трещины растяжения и сбросы. По этим нарушениям развиваются эрозионные процессы: промоины, водотоки и так называемые «поноры». Причиной подвижности Кударского каменного глетчера, по которому проложен высокогорный участок газопровода Дзуарикау-Цхинвал, является активность зон нарушений и погребенные в каменном массиве линзы льда. Эти факторы негативно влияют на состояние газопровода. Для безопасной его эксплуатации принято решение о строительстве тоннеля через главный водораздел. Современные геодинамические условия южного склона Большого Кавказа являются одной из причин концентрации в зонах нарушений напряжений и развития опасных геологических процессов.

Ключевые слова: новейшая тектоника, геодинамика, разломы, зоны нарушений, типы и формы рельефа, экзогенные процессы, напряжения и деформации, каменный глетчер, лавины и сели, каровый рельеф, высокогорный газопровод.

Благодарности: Работа выполнена в рамках Госзадания ГФИ ВНЦ РАН №1021052605830-7-1.5.6. «Оценка современного состояния геодинамического развития центрального сегмента Большого Кавказа и эволюции его основных структур инструментальными геофизическими методами и с помощью глобальных навигационных спутниковых систем».

Для цитирования: Макеев В. М., Ревазов М. О., Болотаева А. Г. Структурно-геодинамические исследования южного склона Большого Кавказа в районе Двалетского поднятия в связи с оценкой зон нарушений. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (4): 31-46. DOI: 10.46698/VNC.2022.75.43.003.

DOI: [10.46698/VNC.2022.75.43.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.75.43.003)

Original paper

Structural and geodynamic studies of the southern slope of the Greater Caucasus in the region of the Dvaletsky uplift in respect of the assessment of fractured zones

V. M. Makeev^{ID}, M. O. Revazov^{ID}, A. G. Bolotaeva^{ID}

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

Received: 27.10.2022, revised: 17.11.2022, accepted: 22.11.2022

Abstract: Relevance. The work is related to the determination of the geodynamic conditions for the fractured zones formation to ensure the safety of the territories of engineering structures. These zones are not always specified in terms of their geodynamic origin and development, which affects the real assessment of territories, including the cases connected with earthquakes and dangerous exogenous geological processes. **The aim** of the research is structural and geodynamic studies in connection with the assessment of the spatial distribution of fractured zones and the features of modern development. **Methods.** Structural and geodynamic method, including lithological (structural-material), structural and geomorphological, geodynamic (structural-kinematic) and remote methods are used in the research. **The result** of the work is the identification of forms and types of landscape, tectonic structures and intense exogenous processes (mudflows, avalanches and landslides) as indicators of the activity of fractured zones. The newest uplifts, downfolds were identified and the zones of disturbances (dislocations) were investigated. According to the morphology and the age, structures with different ranks do not conform to each other, which may indicate their diversity of types in stress condition and origin. The Dvaletsky and Mtiuleti uplifts are considered as the newest anticlines formed under the conditions of compressive stresses. Under the near-surface conditions, they are exposed to tension stresses, possibly due to the growth of uplifts and the location of the arched uplift of the Greater Caucasus on the southern flank. In the axial part of the Main Caucasian Range in the area of the Dvaletsky uplift, local fault zones – reverse faults in the Jurassic-Lower Cretaceous flysch, were studied. They are activated mainly under tension stress conditions. This is confirmed by the results of field observations, i. e. they are associated with tension cracks and faults. Erosion processes develop along these disturbances: water galls, watercourses and the so-called “ponors”. The reason for the mobility of the Kudar rock glacier, along which the high-mountain section of the Dzuarikau-Tskhinval gas pipeline was laid, is the activity of fractured zones and ice lenses buried in the rock massif. These factors negatively affect the condition of the gas pipeline. For its safe operation, a decision was made to build a tunnel through the main divide. The current geodynamic conditions of the southern slope of the Greater Caucasus are one of the reasons for the concentration of stress disturbances and the development of dangerous geological processes in the zones.

Keywords: neotectonics, geodynamics, faults, fractured zones, types and forms landscape, exogenous processes, stresses and strains, rock glacier, avalanches and mudflows, cirque landscape, high-mountain gas pipeline.

Acknowledgments: *The work was carried out according to the state assignment of the GPI VSC RAS No. 1021052605830-7-1.5.6. “Assessment of the current state of the geodynamic development of the central segment of the Greater Caucasus and the evolution of its main structures by instrumental geophysical methods and using global navigation satellite systems”.*

For citation: Makeev V. M., Revazov M. O., Bolotaeva A. G. Structural and geodynamic studies of the southern slope of the Greater Caucasus in the region of the Dvaletsky uplift in respect of the assessment of fractured zones. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (4): 31-46. DOI: [10.46698/VNC.2022.75.43.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.75.43.003).

Введение

Район исследований расположен в Казбекском (Осетино-Ингушском) новейшем сегменте Большого Кавказа, на границе Республики Северной Осетии-Алании и Республики Южной Осетии. Он приурочен к осевой зоне Двалетского неотектонического поднятия, находящегося на южном крыле обширного сводового поднятия Большого Кавказа. Центральным поднятием этого свода является Цейско-Казбекское, принадлежащее Боковому хребту [Комплексная..., 1996] (рис. 1). Казбекский сегмент относится к максимально суженым относительно смежных сегментов: Центрального и Восточного. По мнению акад. Е. Е. Милановского одной из причин этого сужения является активность Терско-Дагестанской системы прогибов, опускание которых влияет на северное крыло свода Большого Кавказа [Милановский, 1968].

Двалетское поднятие как и его геоморфологическое выражение в виде одноименного хребта является сниженным по абсолютным отметкам рельефа (абс. отм.) по сравнению с Боковым хребтом. Максимальные абс. отм. Двалетского хребта составляют 3938 м (гора Халаца) и 3710 м (гора Саухох), между которыми находится Кударский перевал с абс. отм. 3148 м. Высота гор ниже на более чем 1000 м по сравнению с горой Казбек (5033 м), принадлежащей Боковому хребту. Но, несмотря на уменьшенные отметки рельефа, рассматриваемый хребет является частью Главного Кавказского водораздела. Возможно, снижение высот Двалетского хребта, а значит и суммарных новейших амплитуд, вызвано его положением на южном крыле свода Большого Кавказа [Несмеянов, 2004].

Южное крыло свода Большого Кавказа является относительно более широким, чем северное, вследствие наличия структурных ступеней – предорогенных поверхностей выравнивания. Северная асимметрия свода указывает на его геодинамическую связь с Терско-Дагестанским прогибом, с одной стороны, и на связь с закавказским поднятием – Дзирульским неопротерозойским массивом, с другой стороны [Gamkrelidze et al., 2009]. Наличие сквозных транзитных секущих зон, как возможных очагов землетрясений (зоны ВОЗ) подтверждает это предположение [Заалишвили и др., 2017]. Присутствие центров тектоно-магматической активности указывает на существование внутрикоровой активности [Рогожин и др., 2014; Gee, Zeyen, 1996; Rogozhin et al., 2015]. В геодинамическом аспекте разнородные источники напряжений и деформаций могут являться причиной развития разнотипных по происхождению зон нарушений, в т. ч. геодинамически активных зон (ГДАЗ) [Макеев и др., 2015]. Суперпозиция разнородных напряжений может быть причиной распределения активных зон нарушений и зон ВОЗ [Заалишвили и др. 2017; Zaalishvili et al., 2016, 2018; Макеев и др., 2022; Tibaldi et al., 2020].

Структурно-геодинамические исследования направлены на выявление неотектонических структур и геодинамических условий их формирования с целью уточнения и оценки пространственного распределения активных зон нарушений. С этими зонами связаны сейсмичность и интенсивные экзогенные геологические процессы, отрицательно влияющие на территории инженерных объектов [Добрев и др., 2019; Kravchenko et al., 2022; Korzhenkov et al., 2022]. Решение научных задач прямо связано с обеспечением безопасности самого высокогорного в мире магистрального газопровода Дзуарикау-Цхинвал (длина 169 км, диаметр трубы 30 см), построенного в 2009 г. [Макеев и др., 2022; Свалова, 2021]. Газопровод пересекает северный и южный склоны Двалетского хребта и район Кударского перевала (3148 м) Главного Кавказского водораздела. На участке водораздела на глубине 300-400 м планируется возведение тоннеля для обеспечения безопасности газопровода.

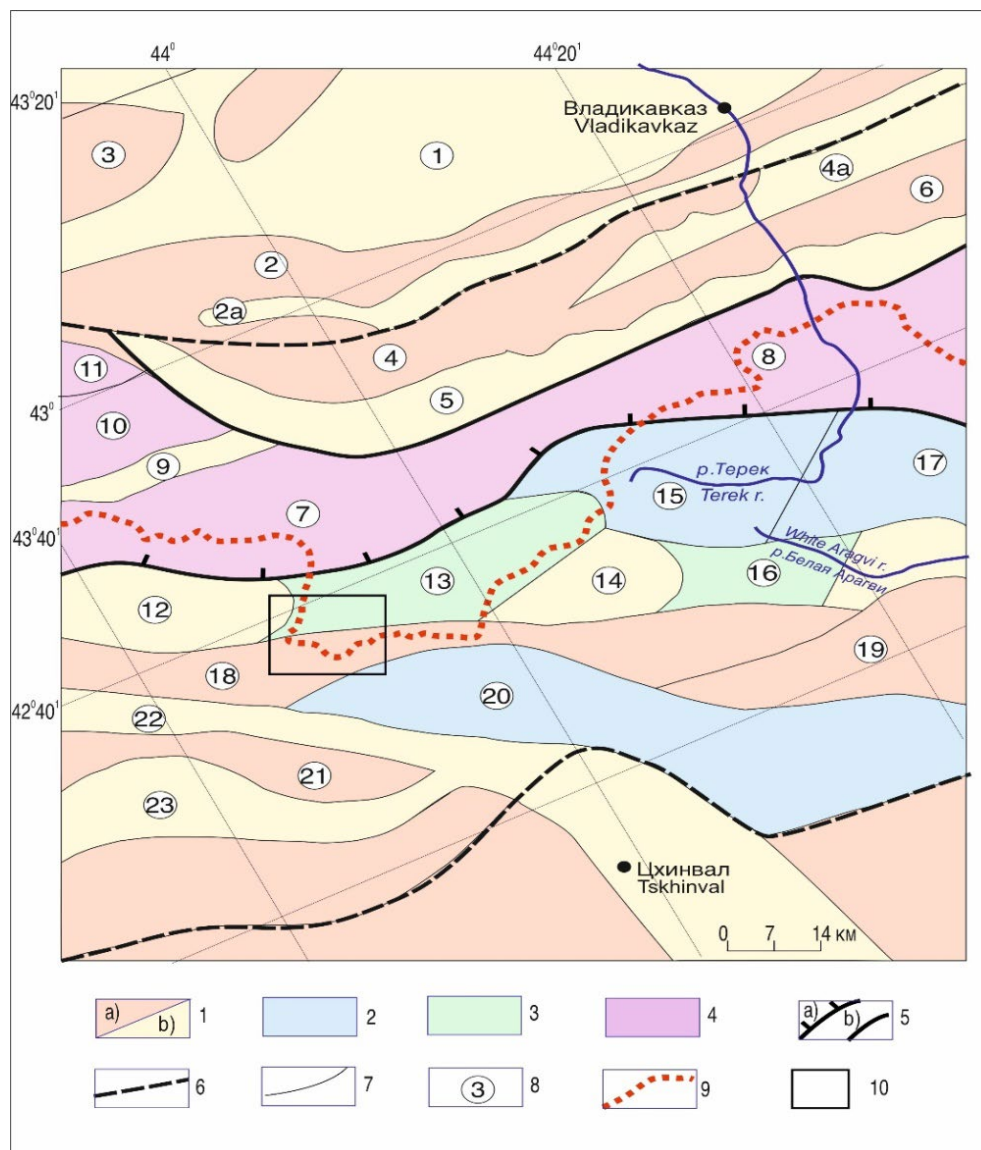


Рис. 1. Неотектонические структуры Казбекского сегмента Большого Кавказа [Комплексная..., 1996].

1 – структуры: а) поднятия, б) прогибы, 2 – структурные ступени, 3 – структурная перемычка (седловина), 4 – Главное Кавказское поднятие, 5 – нарушения: а) Главный Кавказский альпийский надвиг, б) Главный Кавказский сброс, 6 – границы свода Большого Кавказа, 7 – границы структур, 8 – номера структур, 9 – государственная граница РФ, 10 – район детальных исследований в пределах Двалетского хребта.

Система Терско-Дагестанских прогибов: 1 – Осетинский прогиб, 2 – Алагирское поднятие (Лесистая гряда увалов), 2а – Тарская цепь прогибов, 3 – Аргуданское поднятие. Северное крыло свода Большого Кавказа: 4 – Кионхохское поднятие (Скалистый хребет), 4а – Тарско-Балтинский прогиб, 5 – Садонский шовного типа прогиб, 6 – Чмийское поднятие (Скалистый хребет).

Центральное поднятие Большого Кавказа: 7 – Цейско-Казбекское поднятие, 8 – Срединное поднятие, 9 – Верхнеурухский шовный прогиб, 10 – Дыхтауское поднятие, 11 – Верхнебалкарская ступень. Южное крыло свода Большого Кавказа. Гебско-Пасанарская система прогибов: 12 – Верхнерионский прогиб, 13 – Техтинская седловина, 14 – Эрмандонский прогиб, 16 – Келтская вулcano-тектоническая перемычка-седловина (прогиб?). Крестовская ступень: 15 – Шерхотская и 17 – Гудемакарская. 18 – Двалетское поднятие, 19 – Меле-Джавский шовный прогиб (высокая ступень?), 20 – Гудиская ступень, 21 – Квайсинское (Нижнесванетское) поднятие. Шовные прогибы, наследующие разломы: 22 – Уцерско-Павлеурский, 23 – Рача-Лечхумский /

Fig. 1. Neotectonic structures of the Kazbek segment of the Greater Caucasus [Complex..., 1996]. 1 – structures: а) uplifts, б) downfolds, 2 – structural steps, 3 – structural astillens (saddle), 4 – Main

Caucasian uplift, 5 – disturbances: a) Main Caucasian Alpine thrust, b) Main Caucasian fault, 6 – boundaries of the arch of the Greater Caucasus, 7 – boundaries of structures, 8 – numbers of structures, 9 – state border of the Russian Federation, 10 – area of detailed studies within the Dvaletsky range. The system of the Terek-Dagestan downfolds: 1 – Ossetian downfold, 2 – Alagir uplift (Wood ridge), 2a – Tarskaya chain of downfolds, 3 – Argudan uplift. Northern flank of the arch of the Greater Caucasus: 4 – Kionkhokh uplift (Skalistsy Range), 4a – Tarsko-Baltinsky downfold, 5 – Sadon downfold of suture-type, 6 – Chmiysky uplift (Skalistsy Range). Central uplift of the Greater Caucasus: 7 – Tsey-Kazbek uplift, 8 – Middle uplift, 9 – Upper Uruk suture downfold, 10 – Dykhtau uplift, 11 – Upper Balkar step. The southern flank of the arch of the Greater Caucasus. Geboko-Pasanar system of downfolds: 12 – Verkhnerionsky downfold, 13 – Tehtinskaya saddle, 14 – Ermanidon downfold, 16 – Celtic volcano-tectonic astillan -saddle (downfold?). Krestovskaya step: 15 – Sherkhotskaya and 17 – Gudemakarskaya. 18 – Dvaletsky uplift, 19 – Mele-Java suture downfold (high step?), 20 – Gudis step, 21 – Kvaiza (Lower-svaneti) uplift. Suture downfolds which deriving faults: 22 – Utsersko-Pavleuri, 23 – Racha-Lechkhumsky

Методы изучения

Исследования проводятся на основе геолого-геоморфологического, структурно-кинематического (геодинамического) и литологического методов с учетом дистанционного подхода. 1) Геолого-геоморфологический метод включает построение структурно-геоморфологических профилей с выделением эрозионно-денудационных поверхностей выравнивания. Оценка высотного положения и возраста поверхностей позволяет выделить структурные формы, уточнить положение зон нарушений и их возраст [Declan, 2016]. 2) Структурно-кинематический метод направлен на изучение происхождения полей напряжений и оценку типа (сжатие, растяжение, сдвиг). В геодинамическом отношении территории районируются на активные и относительно пассивные с учетом суперпозиции разнотипных по происхождению напряжений [Makeeva, Makeev, 2022]. Оцениваются закономерности пространственного распределения тектонических структур и их интерференция. 3) Литологический метод нацелен на изучение доновейшего (вещественно-структурного) субстрата относительно состава и строения с оценкой состояния пород [Di Toro, et al., 2011]. Сильно измененные породы способны вызвать интенсивное развитие геологических процессов [Чотчаев и др., 2020]. В качестве вспомогательного применяется метод дешифрирования дистанционных материалов (фотоснимков разного разрешения и типа, топографических карт) для выявления линеаментов. Зоны повышенной трещиноватости и разрывов дешифрируются в виде спрямленных линий. Геолого-геоморфологический, структурно-кинематический и литологический методы, включая дистанционный, объединяются в один комплексный структурно-геодинамический метод [Макеев и др., 2015].

Результаты работы и их обсуждение

С целью оценки зон нарушений в рассматриваемом районе были изучены следующие факторы: 1) доновейший вещественно-структурный субстрат, 2) структурно-геоморфологические условия и 3) новейшие дислокации. Камеральные и полевые исследования были проведены в 2012 г. и 2022 г. в районах строительства туристических центров (рр. Мамихдон и Зруг) и реконструкции газопровода Дзуарикау-Цхинвал.

1. Доновейший вещественно-структурный субстрат, по которому определяются показатели проявления современных тектонических процессов, представлен юрско-нижнемеловыми терригенно-карбонатными и вулканогенными отложениями, смятыми в интенсивные складки [Энна, Письменный, 2006] (рис. 2).



Рис. 2. Лежачая складка во флишевых отложениях (J-K_{1v}) в районе Кударского перевала. Лежачая складка и гряда рельефа, как геоморфологическое выражение неотектонического поднятия, не согласуются друг с другом ни по характеру строения, ни по условиям образования /

Fig. 2. Lying overfold in flysch deposits (J-K_{1v}) in the area of the Kudar mountain pass. The lying overfold and landscape ridge, as a geomorphological expression of the neotectonic uplift, do not conform to each other either in the nature of the structure or in the conditions of formation.

На водоразделе и северном склоне Двалетского хребта нижний мел представлен дганльской, невтисхевской и пасанаурской свитами, относящимися к альбскому, аптскому и барремскому ярусам соответственно. Верхнеюрские отложения отвечают думацхойской свите киммериджского яруса. Отложения этих свит представлены аргиллитами, алевролитами, песчаниками часто кварцевыми общей мощностью 2950 м. Реже встречаются мергели и известняки. Эти отложения нарушены складками и разломами северо-западного простирания. Разломы приурочены к границам отложений разных свит, т. е. разломы и простирания пород согласуются друг с другом.

Южный склон Двалетского хребта сложен юрско-раннемеловыми терригенными отложениями Чиаурского флишевого синклинория (J-K_{1v}) [Схематическая..., 2009; Государственная..., 2011]. В этих отложениях, в отличие от северного склона, присутствуют четвертичные дациты и андезиты. В полосе нас. п. Джава-Квайса синклинорий сочленяется с юрским Гагро-Джавским антиклинорием по Уцерско-Павлеурской разломной зоне северо-западного простирания [Рогожин и др., 2014]. К разломной зоне приурочены эоценовые отложения, выраженные в рельефе широким понижением. Флиш смят в субширотные синклинали и антиклинали мел-позднемиоценового возраста (K₂-N₁³).

2. Структурно-геоморфологические условия района исследований характеризуются разнообразными типами и формами рельефа и интенсивными экзогенными геологическими процессами (рис. 3).

Типы рельефа представлены эрозионно-денудационными ступенями, ледниковыми моренными (бугры, холмы, валы) и флювиогляциальными отложениями. В вершинных частях горных пиков Саухох и Халаца наблюдаются современные ледниковые «шапки» с разнотипными моренами на склонах и в долинах рек.

Эрозионно-денудационные ступени классифицированы на высокие (3500-2500 м) неогенового возраста (I, II, III, IV) и относительно низкие (2500 м и ниже) в основном четвертичного возраста (V, VI, VII). Оценка возраста ступеней приблизительная и требует дальнейшего уточнения. За начало неотектонических движений принята относительно древняя ступень позднемиоценового (сарматского) возраста. К этому времени относится формирование первых тонкообломочных моласс орогенного типа. Эта стадия рассматривается в качестве раннеорогенной [Милановский, 1968]. Позднеплиоценовая ступень (акчагыл-апшеронская) сопоставляется с отложениями свиты рухс-дзуар (N_2^3). К этому времени относится формирование валунно-галечниковых и песчано-глинистых отложений с эффузивными и кристаллическими породами общей мощностью 400-1200 м. Рассматриваемые ступени наиболее выразительны на северном слоне Двалетского поднятия в районе правобережья р. Мамихдон и на водоразделах рр. Дзуарикомдон и Халаца. На южном склоне они хорошо выражены на правобережье Саухохской ледниковой долины.

Ледниковые морены и флювиогляциальные отложения тяготеют преимущественно к вершинным частям двух гор Саухох и Халаца. Морены широко распространены в карах и приустьевых частях ледников, где представлены холмами, буграми и валами в виде овалов и полумесяцев. Эти формы прорезаются современными флювиогляциальными ручьями, промоинами и ложбинами.

Формы рельефа – это кары, трогии (полки), уступы, ущелья и гряды (гребни, гривы, дайки). На склонах устанавливаются промоины и ложбины, как формы плоскостного смыва и каналы лавино-селевых потоков.

Кары в форме полуцирка с современными ледниками и без них распространены в верховьях рр. Козидон и Земергондон (Земергон). В них скапливаются моренные и коллювиальные отложения, относящиеся к каменным глетчерам. Наиболее изученным является Кударский кар, приуроченный к северному склону Двалетского хребта. Выше над каром находится одноименный Кударский перевал. По ним в 2009 г. проложен магистральный газопровод Дзуарикау-Цхинвал. Мощность морены составляет в среднем 40-60 м. В процессе бурения для обустройства газопровода в обломочной массе на глубинах приблизительно 1,5-3,0 м установлены линзы льда. В летний период происходит его частичное таяние, что приводит к образованию провалов и к сползанию каменной массы. Ее смещение приводит к растяжению газопровода и к частым авариям.

Все кары генетически сопряжены с разновозрастными троговыми долинами, которые в виде разновысотных уступов-плеч (полок) развиты на склонах (рис. 4). В долине р. Земергон насчитывается около четырех разновысотных троговых генераций ледникового генезиса. Предполагается, что две из них самых высоких являются среднечетвертичными, оставшиеся две генерации, которые пониже – позднечетвертичные. На происхождение трогов, связанное с движением ледника, указывают отполированные скалы – бараньи лбы. Они наблюдаются на поверхностях полок и их боковых стенках в виде многочисленных следов горизонтальной экзарации. Моренные и коллювиальные отложения, накапливающиеся в карах, являются источником лавинных и селевых опасностей.

Все долины ледниковой зоны относятся к категории троговых. В реках развита пойма с хорошо промытым горным аллювием. Надпойменные речные террасы не установлены.

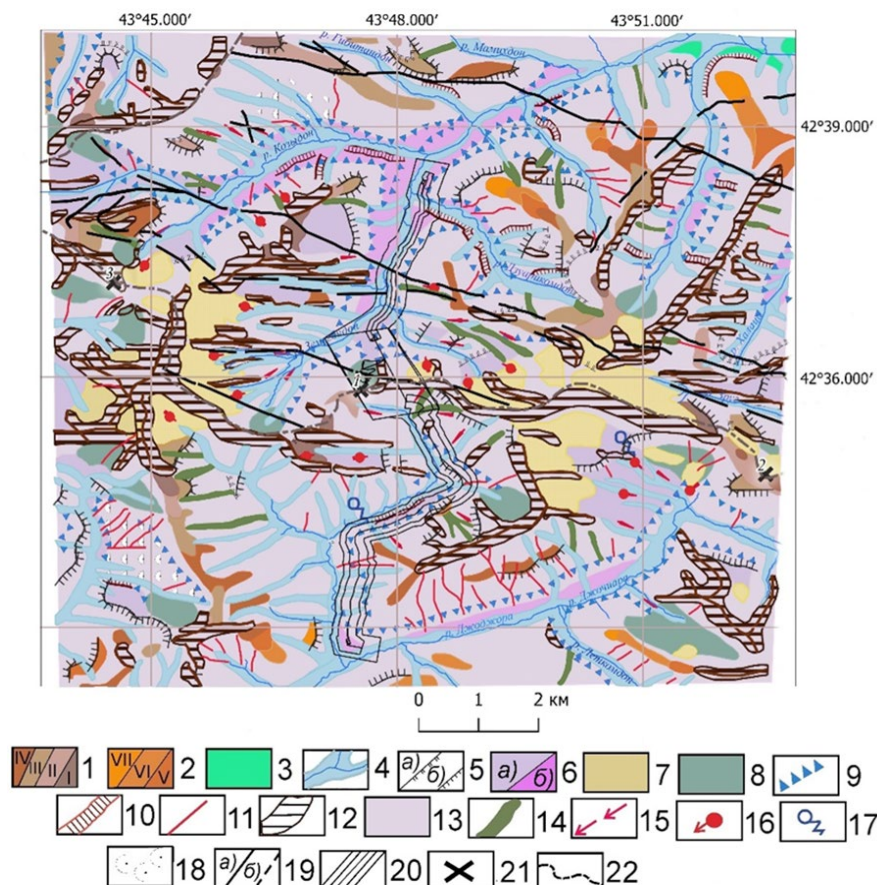


Рис. 3. Структурно-геоморфологический план осевой зоны Двалетского поднятия. Типы рельефа. Эрозионно-денудационные ступени: 1 – высокие (3500-2500 м) неогенового возраста (I, II, III, IV) и 2 – относительно низкие (2500 м и ниже) четвертичного возраста (V, VI, VII). 3 – первая надпойменная терраса, 4 – поймы рек голоценовые. 5 – Элементы строения разновозрастных ступеней: а) тыловой шов, б) бровка. 6 – Ледниковые отложения разновозрастные: а) моренные массивы на водоразделах рек, б) моренные и флювиогляциальные отложения нерасчлененные в долинах рек, 7 – современные ледники. Формы рельефа. 8 – Кары, 9 – трогги четвертичного возраста, 10 – обрывы, уступы и ущелья; 11 – промоины, 12 – скалы с гребнями и с коллювием, 13 – склоны долин с тыловыми швами и бровками, 14 – ложбины. 15 – Селевые водотоки с очагами ледниковых, пролювиальных и коллювиальных пород, 16 – лавинные лотки предполагаемые, 17 – источники подземных вод (ключи) 18 – оползневые склоны. 19 – Разломы мезозойские: а) установленные, б) предполагаемые [Ольховский, Тибилов, 1998]. 21-газопровод Дзуарикау-Цхинвал, 22 – высокогорные перевалы: Кударский (1), Дзедо (2), Козский (3); 23 – государственная граница Республики Северная Осетия-Алания РФ и Республики Южная Осетия /

Fig. 3. Structural and geomorphological plane of the axial zone of the Dvaletsky uplift. Landscape types. Erosion and denudation steps: 1 – high (3500-2500 m) of Neogene age (I, II, III, IV) and 2 – relatively low (2500 m and below) of Quaternary age (V, VI, VII). 3 – the first terrace above the floodplain, 4 – Holocene river floodplains. 5 – Elements of the structure of steps of different ages: a) inner suture, b) edge. 6 – Glacial deposits of different ages: a) morainal massifs on the rivers divide, b) morainal and fluvio-glacial deposits undivided in river valleys, 7 – modern glaciers. Landforms. 8 – kars, 9 – Quaternary troughs, 10 – cliffs, ledges and gorges; 11 – water galls, 12 – rocks with ridges and colluvium, 13 – slopes of valleys with inner sutures and edges, 14 – hollows. 15 – mudflows with foci of glacial, proluvial and colluvial rocks, 16 – presumed avalanche channels, 17 – groundwater sources (springs) 18 – landslide slopes. 19 – Mesozoic faults: a) established, b) presumed [Olkhovsky, Tibilov, 1998]. 21 – Dzuarikaу-Tskhinvali gas pipeline, 22 – high-mountain passes: Kudar (1), Dzede (2), Kozsky (3); 23 – state border of the Republic of North Ossetia – -Alania of the Russian Federation and the Republic of South Ossetia

Интенсивные экзогенные геологические процессы представлены селевыми потоками, лавинными лотками и оползневыми склонами.

Селевые водотоки с источниками рыхлых каменных пород ледникового, коллювиального, пролювиального и делювиального генезиса имеют широкое распространение. Старые и свежие следы прохождения селевых потоков наблюдаются в верховьях рр. Верх. Земегон, Верх. Цитидон, Джоджора и на левобережье р. Козидон. В большинстве случаев они представляют собой прямолинейные промоины, дно которых часто заполнено рыхлообломочными отложениями – пролювием. В основании склонов и дорожных выемках преобладают нагромождения обломочных пород в форме конусов выноса с неровной, бугристой поверхностью. Лавинные лотки здесь также широко развиты. Нижняя граница лавино-селевой опасности может опускаться до абс. отм. 1200 м. Углы наклона промоин, как каналов-следов этой опасности, колеблются в пределах $35^{\circ} - 45^{\circ}$.

Оползневые склоны приурочены к значительным перепадам рельефа, где распространены аргиллиты и алевролиты и др. породы с интенсивной тектонической раздробленностью. На их образование оказывает влияние сейсмичность. В этом случае происходит сейсмогравитационное обрушение склонов [Чотчаев и др., 2020]. Сложены оползни щебнем, небольшими глыбами, сцементированными суглинком. Как правило, это породы, которыми представлены склоны. Мощность оползневых масс может достигать 100-120 м. Наиболее отчетливо они выражены на левобережьях рр. Козидон и Везурыдон. В случае устойчивого подмывания и подрезания склонов рекой гравитационные образования находятся в активной стадии. Обрывы, уступы и ущелья в долинах рек частое явление. Большая их часть распространена в долинах рек Ср. Земегон и Джоджора.



Рис. 4. Устье Кударского кара с моренными нагромождениями. Современный кар раскрывается в троговую долину р. Земегон. В левом склоне долины образованы плечи (полки), связанные с экзарационной деятельностью более древнего трога /

Fig. 4. The mouth of the Kudar kar with morainal accumulation. A modern kar opens into the trough valley of the river Zemegon. On the left slope of the valley, shoulders (shelves) are formed, associated with the exaration activity of an older trough

3. Новейшие (неотектонические) структуры в осевой зоне Двалетского поднятия представлены Саухох-Халацким, Козикомрахским и Мачхарахским главными поднятиями, сопряженными с Козидон-Земегонским, Джоджора-Зругским и Земегон-Цитидонским прогибами (рис. 5). Суженный характер формирования прогибов, сопряженных с более широкими поднятиями, может указывать на возможную их связь с зонами разрывов. Главные структуры дифференцированы на локальные поднятия и прогибы. Характерным является несогласованность разноранговых структур по морфологии (простирацию и очертаниям), что прямо указывает на наличие дополнительных внутрикоровых источников тектонических напряжений.

Линеаменты, выявленные на основе дистанционных методов, по длине делятся на протяженные (транзитные) и относительно короткие (локальные). Протяженные линеаменты запад – северо-западного (субширотного) простирания наиболее выразительны – они наследуют зоны разломов, образованные в нижнемеловых отложениях. С этой точки зрения эти разломы можно отнести к категории активизированных (см. рис. 5).

К субширотным линеаментам приурочены специфические отрицательные (вогнутые) и положительные (выгнутые) формы рельефа. В первых локализованы кары с каменными глетчерами и современные ледниковые «шапки». Вторые, выраженные узкими гребнями, выполняют роль источников коллювиальных (обвальнo-осыпных) отложений. Сочетание этих форм рельефа приводит к формированию классического карлингового типа рельефа в ледниковой зоне Двалетского хребта. К субширотным линеаментам приурочен Кударский кар (каменный глетчер) с вложенным в него магистральным газопроводом. Один из этих линеаментов согласуется с разломом, локализованным в нижнемеловых отложениях, что указывает на активность нарушения. Это нарушение может являться одной из причин негативной подвижности каменного глетчера, которая (подвижность) вызывает периодические аварии на газопроводе. По этой причине кар относится к специфическому перемещаемому типу.

Особенным является Земегон-Цитидонский субмеридиональный прогиб шовного типа. Положение прогиба между двумя пиками Халаца и Саухох и его ограниченность Козидон-Земегонским и Джоджора-Зругским прогибами позволяет сделать вывод о происхождении его в связи с ростом и расширением внутрикоровых тектоно-магматических центров – Халацкого и Саухохского. Эти центры являются поднятиями с радиальным типом строения. Сопряжение этих центров, локализованных исключительно в Двалетском поднятии, приводит к формированию Земегон-Цитидонского прогиба, включающего Кударский перевал. Относительная пологость этого прогиба на фоне крутых поднятий была одним из условий для принятия решения проектирования по нему газопровода Дзуарикау-Цхинвал.

Согласно геодинамическим условиям, Земегон-Цитидонский субмеридиональный прогиб может наследовать зону сбросо-сдвиговых нарушений, что подтверждается полевыми исследованиями. В рельефе впервые выявлен разлом сбросового типа С-З простирания с кулисообразным строением, косо пересекающий Земегон-Цитидонский прогиб (рис. 6). На Кударском перевале, входящем в этот прогиб, выявлены разнотипные трещины растяжения шириной от первых сантиметров до 50 см, заполненные обломками пород.

Двалетское поднятие на севере сопряжено с Верхне-Рионским (Адайком-Мамисонским) прогибом, наследующим Тибский разлом. На юге поднятие сочленяется с

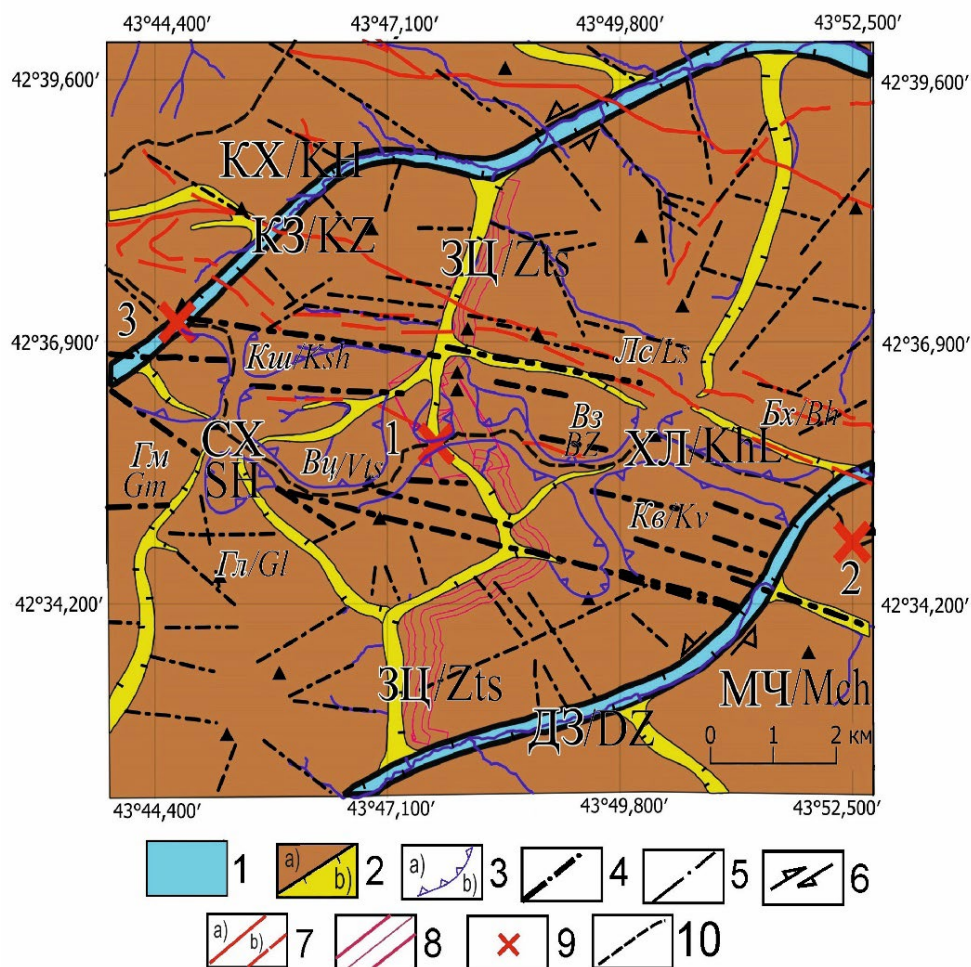


Рис. 5. Неотектонические структуры Двалетского миоценового поднятия.

1 – главные прогибы шовного типа, 2 – локальные структуры: а) поднятия секторального типа, б) прогибы радиального типа; 3 – формы рельефа: а) отрицательные с лавино-селевыми очагами, б) положительные как источники коллювия; 4 – линеаменты транзитные; 5 – линеаменты локальные; 6 – зоны взбросо-сдвиговых деформаций, 7 – доновейшие (мезозойские) разрывы: а) установленные, б) предполагаемые. Другие обозначения: 8 – газопровод Дзуарикау-Цхинвал, 9 – горные перевалы: Кударский (1), Дзедо (2), Козский (3); 10 – государственная граница Республики Северная Осетия-Алания РФ и Республики Южная Осетия. Названия структур. Главные поднятия: Саухох-Халацкое (Саухохское – CX, Халацкое – ХЛ), Козикомрахское (КХ), Мачхарахское (МЧ). Главные прогибы: КЗ – Козидон-Земегонский, ДЗ – Джоджора-Зругский, 3Ц – Земегон-Цитидонский. Локальные поднятия: Бх – Бирахитхохское, Лс – Лисринское, ВЗ – Верхнеземегонское, Кв – Кевсельтинское, Кш – Кошарское, Гм – Гармагольское, Гл – Гулкантовское, ВЦ – Верхнецитидонское. Локальные прогибы, сопряженные с одноранговыми поднятиями, без названий /

Fig. 5. Neotectonic structures of the Dvaletsky Miocene uplift. 1 – main suture type downfolds, 2 – local structures: а) sectoral uplifts, б) radial downfolds; 3 – landforms: а) negative with avalanche-mudflow centers, б) positive as sources of colluvium; 4 – transit lineaments; 5 – local lineaments; 6 – zones of reverse-shear deformations, 7 – recent (Mesozoic) ruptures: а) established, б) presumed. Other designations: 8 – Dzuarikau-Tskhinval gas pipeline, 9 – mountain passes: Kudar (1), Dzede (2), Kozsky (3); 10 – the state border of the Republic of North Ossetia-Alania of the Russian Federation and the Republic of South Ossetia. Structure names. The main uplifts are: Saukhokh-Khalatskoye (Saukhokhsкое – SH, Khalatskoye – KhL), Kozikomrakhskoye (KH), Machkharahskoye (MCh). Main troughs: KZ – Kozidon-Zemegonsky, DZ – Dzhodzhora-Zrugsky, ZTs – Zemegon-Tsitidonsky. Local uplifts: Bh – Birakhithokhsкое, Ls – Lisrinskoye, VZ – Verkhnezemegonskoye, Kv – Kevselta, Ksh – Kosharskoye, Gm – Garmagolskoye, Gl – Gulkantovskoye, VTs – Verkhnetsitidonskoye. Local downfolds associated with peer uplifts, unnamed



Рис. 6. Активный разлом С-З простирания сбросового типа в долине р. Ниж. Цитидон, косо пересекающий склон Земегон-Цитидонского новейшего прогиба /
Fig. 6. Active fault of NW-trending fault type in the valley of the river Nizhniy Tsitidon obliquely crossing the slope of the Zemegon-Tsitidon recent downfold

Гудисской структурной ступенью, плавно переходящей в Рача-Лечхумский шовный прогиб. Этот прогиб наследует альпийскую зону разломов, с которой связывается сильнейшее Рачинское землетрясение 1991 г. По одним данным Двалетское (Шода-Халацкинское) поднятие является горстом, Рача-Лечхумский прогиб – грабеном [Аверьянова и др., 1996; Несмеянов, 2004.]. По другим данным Двалетское поднятие считается поднятием-антиклиналью, образованной в условиях напряжений сжатия [Gamkrelidze et al, 2009]. Если принять эту точку зрения, то Козидон-Земегонский и Джоджора-Зругский шовные прогибы следует рассматривать как зоны взбросо-сдвигового типа вследствие малой ширины и большой протяженности.

В связи с признанием существования разнородных и разнотипных источников напряжений в земной коре, нами не исключается, что рассматриваемый район находится под влиянием глубинных неотектонических напряжений сжатия и приповерхностного растяжения. В этих условиях тектонические зоны нарушений находятся под влиянием суперпозиции разнородных напряжений, что может явиться причиной их сейсмогенной активности.

Выводы

Осевая зона Главного Кавказского хребта в районе Двалетского поднятия характеризуется следующими структурно-геодинамическими условиями развития.

1) Геологический субстрат (основание), по которому формируются неотектонические структуры и зоны нарушений, представлен флишевыми отложениями, смятыми в интенсивные позднеюрско-палеоценовые, а, по другим данным, поздне-мел-миоценовые ($K_2-N_1^3$) складки и разрывы в основном взбросового типа. Среди доновейших дислокаций редко, но выявлены активизированные зоны нарушений. В основном они приурочены к осевой части Двалетского неотектонического (миоценового) поднятия и выражены открытой трещиноватостью двух типов: послойной и секущей. Их активность связана с современными напряжениями растяжения. По зонам нарушений образуются промоины, отверстия типа поноров и водотоки. В этих нарушениях происходит скопление жильной воды, что может негативно сказаться на горно-геологических условиях проходки газопроводного тоннеля Дзуарикау-Цхинвал.

2) Ледниковая водораздельная зона характеризуется исключительно моренными и водно-флювиогляциальными типами и формами рельефа. Речные долины имеют троговое происхождение, связанное исключительно с ледниковыми карами. Кударский кар характеризуется повышенной подвижностью каменного глетчера вследствие погребенного льда. В летние месяцы происходит частичное таяние этого льда, что вызывает смещение обломочной массы и магистрального газопровода. Источниками лавино-селевой опасности являются кары с ледниками, мореной и коллювием, а также пролювиальные и делювиальные накопления большой мощности. Сносимая каменная масса приводит к перекрытию и разрушению сезонного притрассового проезда, несмотря на укрепление водотоков спецплиткой и водоотводными трубами.

3) В верховьях рр. Цитидон и Земегондон главные и локальные неотектонические структуры не согласуются друг с другом по морфологии и условиям образования, что указывает на разнотипное по напряженному состоянию развитие. Двалетское поднятие, как и находящееся восточнее Мтиулетское поднятие, рассматриваются как новейшие антиклинали, формирующиеся в условиях напряжений сжатия. В приповерхностных условиях они подвергаются воздействию напряжений растяжения, возможно в связи нахождением поднятий на южном крыле свода Большого Кавказа.

Нами не исключается, что находящиеся за пределами района исследований Уцерско-Павлеурская взбросовая зона, Главный Кавказский надвиг, Рача-Лечхумская зона грабенов и Тибский разлом альпийского возраста также подвергаются влиянию разнотипных напряжений. Современная активность Уцерско-Павлеурского взброса в рельефе выражена узким понижением, соответствующим зоне растяжения. В рельефе Главный Кавказский надвиг представлен флексурой растяжения. Рача-Лечхумская зона грабенов на современной стадии развития испытывает сжатие, подтвержденное механизмами очагов Рачского землетрясения, включая афтершоки. Таким образом, зоны нарушений находятся под влиянием одновременно суммарных альпийских и современных (голоценовых) напряжений, которые могут не согласовываться структурно-кинематическому типу. С нашей точки зрения, современные геодинамические условия рассматриваемого района являются одной из причин образования зон нарушений и концентрации в них напряжений сейсмогенного типа.

Литература

1. Добрев Н. Б., Иванов П. Г., Свалова В. Б., Заалишвили В. Б., Дзеранов Б. В. Опасные экзогенные процессы в горных районах Северного Кавказа и Болгарии. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2019. – Т. 4. № 4 (18). – С. 5-14.
2. Заалишвили В. Б., Бергер М. Г., Мельков Д. А. Задачи инструментального мониторинга Казбекского вулканического центра. // Геолого-геофизические исследования глубинного строения Кавказа: современные вызовы и методы исследований. – Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН, 2017. – С. 416-422.
3. Комплексная оценка сейсмической опасности территории г. Грозного (Уточнение исходной сейсмичности. Сейсмическое микрорайонирование. Сейсмический риск). / В. Н. Аверьянова, Ю. И. Баулин, Г. Л. Кофф [и др.]; научный редактор профессор С. И. Полтавцев; Минстрой России, Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) [и др.]. – Москва, 1996. – 106 с.
4. Макеев В. М., Макарова Н. В., Леденев В. Н., Дорожко А. Л. Основы концепции геодинамической безопасности экологически опасных сооружений. // Геоэкология. – 2015. – № 2. – С. 99-110.
5. Макеев В. М., Ревазов М. О., Болотаева А. Г. Пространственное распределение зон нарушений в РСО – Алания. // Коллект. монография VIII межд. конф. «Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии». – 2022. – С86-90.
6. Милановский Е. Е. Новейшая тектоника Кавказа. – М.: Недра, 1968. – 484 с.
7. Несмеянов С. А. Инженерная геотектоника. – М.: Наука, 2004. – 780 с.
8. Ольховский Г. П., Тибилов С. М. Составление специализированной геологической основы масштаба 1:50 000 для прогнозно-металлогенической карты Горной Осетии. // МПР РФ, Госкомнедра РСО-Алания, Северо-Осетинское горно-геолог. – Владикавказ: «Севосгелогоразведка», 1998. – 491 с.
9. Рогожин Е. А., Овсяченко А. Н., Лутиков А. И., Собисевич А. Л., Собисевич Л. Е., Горбатилов А. В. Эндогенные опасности Большого Кавказа. – М.: ИФЗ РАН, 2014. – 256 с.
10. Свалова В. Б. Управление геоэкологическим риском и проблемы устойчивого развития горных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 12 (1). – С. 129-147. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010
11. Чотчаев Х. О., Бурдзиева О. Г., Заалишвили В. Б. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10 (4). – С. 70-100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005
12. Энна Н. Л., Письменный А. Н. Геологическое доизучение площадей (ГДП-200) в пределах восточного сегмента зоны Главного хребта Центрального Кавказа (листы К-38-IX, XV)». Книга 1. – Ессентуки: ФГУГП «Кавказгеолсъемка», 2006. – 231 с.
13. Declan A. Valters Modelling Geomorphic Systems: Landscape Evolution. // Geomorphological Technique. – 2016. – Chap. 5. – Sec. 6.12. – pp. 312-320.
14. Di Toro G., Han R., Hirose T. Fault lubrication during earthquakes. Nature. – 2011. – Vol. 471 – pp. 494-498.
15. Gamkrelidze I. P., Pruidze M. P., Gamkrelidze M. I., Loladze V. I. Tectonic map Georgia. / Editor: I. P. Gamkrelidze. Scale 1:500 000. Georgian National Academy of Sciences. Alexandre Janelidze Geological Institute of Georgian Ministry of Education and science. Georgian Ministry of Environment and Natural Resources. – 2009.
16. Gee D. G., Zeyen H. J. EUROPROBE 1996. – Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents. // Uppsala University. – 1996. – 138 p.
17. Kravchenko I. M., Pikulik E. A., Makeev V. M., Gousseltsev A. S., Makeeva E. A. Structural-geomorphological conditions of the Balakovo Nuclear Power Plant site in terms of the stability. // Research Earth Sciences. – 2022. – pp. 17-28.
18. Korzhenkov A. M., Deev E. V., Korzhenkova L. A., Rogozhin E. A. Strong Seismic Activity of the Terskey Ala-Too Range Adyrs, Northern Tien Shan, in the Holocene from Radiocarbon

Analysis Data. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2022. – Vol. 58. No. 2. – pp. 243-266.

19. Makeeva E.A., Makeev V.M. Principles of studying Quaternary deformations based on structural and geodynamic studies. // *Recent Research and Perspectives on Fundamental and Applied Problems of Geology and Geophysics (ReEarth-378)*. «Springer Nature». – 2022. – pp. 37-46.

20. Rogozhin E.A., Gorbatiykov A.V., Zaalishvili V.B., Stepanova M.Y., Andreeva N.V., Kharazova, Y.V. New data on the deep structure, tectonics, and geodynamics of the Greater Caucasus. // *Doklady Earth Sciences*. – 2015. – Vol. 462 (1). – pp. 543-545. DOI: 10.1134/S1028334X15050244

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

22. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A.S., Dzeranov B.V., Shepelev V.D. Application of microseismic and calculational techniques in engineering-geological zonation. // *International Journal of GEOMATE*. – 2016. – Vol. 10 (1). – pp. 1670-1674.

23. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Morozov F.S., Tuaeov G.E. Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center. // *International Journal of GEOMATE*. – 2018. – Vol. 15 (47). – pp. 158-163. DOI: 10.21660/2018.47.20218

References

1. Dobrev N.B., Ivanov P.G., Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Dzeranov B.V. Hazardous exogenous processes in the mountains of the North Caucasus and Bulgaria. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2019. Vol. 4. No. 4. pp. 5-14. (in Russ.)

2. Zaalishvili V.B., Berger M.G., Melkov D.A. Problems of Instrumental Monitoring of the Kazbek Volcanic Center. In: *Geol. and geoph. studies of the deep structure of the Caucasus*. Vladikavkaz, GPI VSC RAS. 2017. pp. 416-422. (in Russ.)

3. Averyanova V.N., Baulin Yu.I., Koff G.L. Comprehensive assessment of the seismic hazard of the territory of Grozny (Refining baseline seismicity. Seismic microzootation. Seismic risk). Ministry of Construction of Russia, PNIIS. Moscow. 1996. 106 p. (in Russ.)

4. Makeev V.M., Makarova N.V., Ledenev V.N., Dorozhko A.L. Fundamentals of the concept of geo-dynamic safety of environmentally hazardous structures. *Geoecology*. 2015. No. 2. pp. 99-110. (in Russ.)

5. Makeev V.M., Revazov M.O., Bolotayeva A.G. Spatial distribution of disturbance zones in North Ossetia – Alania. In: *VIII int. conf. Haz. nat. and anth. proc. in mount. regions*. 2022. pp. 86-90. (in Russ.)

6. Milanovsky E.E. Recent tectonics of the Caucasus. Moscow. Nedra. 1968. 484 p. (in Russ.)

7. Nesmeyanov S.A. Engineering geotectonics. Moscow. Nauka. 2004. 780 p. (in Russ.)

8. Olkhovsky G.P., Tibilov S.M. Compilation of a specialized geological basis at a scale of 1:50,000 for the prognostic-metallogenic map of Mountainous Ossetia. MNR, State Subsoil Committee of RNO-A, Vladikavkaz, Sevosgeologorazvedka. 1998. 491 p. (in Russ.)

9. Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Lutikov A.I., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Gorbatiykov A.V. Endogenous hazards of the Greater Caucasus. Moscow. IPE RAS. 2014. 256 p. (in Russ.)

10. Svalova V.B. Geoecological risk management and problems of sustainable development of mountain territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12 (1). pp. 129-147. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010 (in Russ.)

11. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of high mountain areas. *Geology and Geophysics of Russian South*.

2020. Vol. 10 (4). pp. 70-100. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005.

12. Enna N.L., Pismenny A.N. Geological additional study of areas (GDP-200) within the eastern segment of the zone of the Main Range of the Central Caucasus (sheets K-38-IX, XV). Book 1. Essentuki, FSUGE Kavkazgeolsemka. 2006. 231 p. (in Russ.)

13. Valters D.A. Modelling Geomorphic Systems: Landscape Evolution. Geomorphological Technique. 2016. Chap. 5. Sec. 6.12. pp. 312-320.

14. Di Toro G., Han R., Hirose T. Fault lubrication during earthquakes. *Nature*. 2011. Vol. 471 pp. 494-498.

15. Gamkrelidze I.P., Pruidze M.P., Gamkrelidze M.I., Loladze V.I. Tectonic map Georgia. Scale 1:500000. Georgian National Academy of Sciences. Alexandre Janelidze Geological Institute of Georgian Ministry of Education and science. Georgian Ministry of Environment and Natural Resources. 2009.

16. Gee D.G., Zeyen H.J. EUROPROBE 1996. Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents. Uppsala University. 1996. 138 p.

17. Kravchenko I.M., Pikulik E.A., Makeev V.M., Gousseltsev A.S., Makeeva E.A. Structural-geomorphological conditions of the Balakovo Nuclear Power Plant site in terms of the stability. *Research Earth Sciences*. 2022. pp. 17-28.

18. Korzhenkov A.M., Deev E.V., Korzhenkova L.A., Rogozhin E.A. Strong Seismic Activity of the Terskey Ala-Too Range Adyrs, Northern Tien Shan, in the Holocene from Radiocarbon Analysis Data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2022. Vol. 58. No. 2. pp. 243-266.

19. Makeeva E.A., Makeev V.M. Principles of studying Quaternary deformations based on structural and geodynamic studies. *Recent Research and Perspectives on Fundamental and Applied Problems of Geology and Geophysics (ReEarth-378)*. Springer Nature. 2022. pp. 37-46.

20. Rogozhin E.A., Gorbatiykov A.V., Zaalishvili V.B., Stepanova M.Y., Andreeva N.V., Kharazova, Y.V. New data on the deep structure, tectonics, and geodynamics of the Greater Caucasus. *Doklady Earth Sciences*. 2015. Vol. 462 (1). pp. 543-545. DOI: 10.1134/S1028334X15050244

21. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., et al. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020. Vol. 88. pp. 104108.

22. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A.S., Dzeranov B.V., Shepelev V.D. Application of microseismic and calculational techniques in engineering-geological zonation. *International Journal of GEOMATE*. 2016. Vol. 10 (1). pp. 1670-1674.

23. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Morozov F.S., Tuaev G.E. Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center. *International Journal of GEOMATE*. 2018. Vol. 15 (47). pp. 158-163. DOI: 10.21660/2018.47.20218

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34; 539.3

DOI: [10.46698/VNC.2022.80.98.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.80.98.004)

Оригинальная статья

Об одном новом предвестнике
повышенной сейсмичностиО. В. Евдокимова^{1,2}, В. А. Бабешко^{1,2}, А. В. Павлова¹,
В. С. Евдокимов¹, О. М. Бабешко¹¹Кубанский государственный университет, Россия, 350059, г. Краснодар,
ул. Ставропольская, 149, e-mail: rector@kubsu.ru;²Южный научный центр Российской академии наук, Россия, 344005,
Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: ras@ssc-ras.ru, babeshko41@mail.ru

Статья поступила: 03.11.2022, доработана: 30.11.2022, одобрена в печать: 05.12.2022

Резюме: Актуальность работы состоит в необходимости дальнейшего развития применения высокоточных механико-математических методов в проблеме прогноза нарастания сейсмичности. Целью проведенных исследований явилось решение задачи выявления условий резонансного поведения гармонически колеблющихся литосферных плит, вызываемого периодическими приливными воздействиями Луны. **Методы работы.** Применение новейших математических разработок в области механики деформируемых штампов, опубликованных в высокорейтинговых журналах. Изучается тот случай, когда разлом достаточно велик и литосферные плиты удалены торцами. Каждая из литосферных плит оказывается автономной и может рассматриваться как деформируемый штамп. Применяется новейшая, разработанная с помощью метода блочного элемента, теория деформируемых штампов. В процессе исследования применен созданный авторами новый универсальный метод моделирования, позволяющий решения векторных граничных задач для систем дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих материалы сложных реологий, представлять разложенными по решениям отдельных скалярных граничных задач. **Результаты исследования.** Недавно разработанная теория контактных задач с деформируемыми штампами, действующими на слоистое основание, позволила в явном виде выявлять соотношения, описывающие резонансные частоты гармонически колеблющихся штампов. Эта теория применена для литосферной плиты в форме полосы конечной ширины, лежащей на слоистом основании, моделируемой деформируемым штампом. Для этого случая найдено соотношение, позволяющее вычислять резонансные частоты, свидетельствующие о возможном разрушении плиты, то есть землетрясении. Появление дискретной резонансной частоты в контактных задачах о действии деформируемых штампов на слоистую среду было предсказано в работах академика И. И. Воровича. Необходимость привлечения механических подходов к проблеме прогноза землетрясений высказывалась академиком Г. А. Гамбурцевым. Академику М. А. Садовскому принадлежит позиция, связанная с необходимостью учета кусковатого строения земной коры, то есть блочного строения, в вопросах прогноза землетрясений и выявления новых опасных явлений. Таким образом, с помощью применяемых новых методов в работе доказана возможность получения соотношений, позволяющих оценивать степень опасности разрушения литосферных плит, поскольку удастся получить все недостающие для этого соотношения.

Ключевые слова: литосферные плиты, резонансы, землетрясение, контактная задача, деформируемые штампы, интегральное уравнение.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № МФИ-20.1/6.

Для цитирования: Евдокимова О. В., Бабешко В. А., Павлова А. В., Евдокимов В. С., Бабешко О. М. Об одном новом предвестнике повышенной сейсмичности. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (4): 47-58. DOI: [10.46698/VNC.2022.80.98.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.80.98.004).

GEOPHYSICS

DOI: [10.46698/VNC.2022.80.98.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.80.98.004)

Original paper

About one new precursor of increased seismicity

O. V. Evdokimova^{ID}2, V. A. Babeshko^{ID}1, 2, A. V. Pavlova^{ID}1,
V. S. Evdokimov^{ID}1, O. M. Babeshko^{ID}1

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

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

Received: 03.11.2022, revised: 30.11.2022, accepted: 05.12.2022

Abstract: The relevance of the work consists in the need for further development of the use of high-precision mechanical and mathematical methods in the problem of forecasting the increase in seismicity. **The aim** of the research was to solve the problem of identifying the conditions of resonant behavior of harmoniously oscillating lithospheric plates caused by periodic tidal impacts of the Moon. **Methods.** Application of the latest mathematical developments in the field of mechanics of deformable stamps published in highly rated journals. The case is being studied when the fault is large enough and the lithospheric plates are removed by the ends. Each of the lithospheric plates turns out to be autonomous and can be considered as a deformable stamp. The latest theory of deformable stamps developed by the block element method is applied. In the course of the research, a new universal modeling method was used that allows solutions of vector boundary value problems for systems of partial differential equations describing materials of complex rheologies to be decomposed according to solutions of individual scalar boundary value problems. As a result of the study, the recently developed theory of contact problems with deformable stamps acting on a layered base allowed us to explicitly identify the relations describing the resonant frequencies of harmonically oscillating stamps. **The results** is applied to a lithospheric plate in the form of a strip of finite width lying on a layered base, modeled by a deformable stamp. For this case, a ratio has been found that allows us to calculate the resonant frequencies indicating the possible destruction of the plate, that is, an earthquake. The appearance of a discrete resonant frequency in contact problems on the action of deformable stamps on a layered medium was predicted in the works of Academician I. I. Vorovich. The need to involve mechanical approaches in the problem of earthquake prediction was expressed by academician G. A. Gamburtsev. Academician M. A. Sadovsky has a position related to the need to take into account the lumpy structure of the earth's crust, that is, the block structure, in matters of earthquake prediction and the identification of new hazardous phenomena. Thus, using the new methods used in the work, the possibility of obtaining ratios that allow assessing the degree of danger of destruction of lithospheric plates is proved, since it is possible to obtain all the missing ratios for this.

Keywords: lithospheric plates, resonances, earthquake, contact problem, deformable stamps, integral equation.

Acknowledgments: The research is carried out with the financial support of the Kuban Science Foundation in the framework of the scientific project № MFI-20.1/6.

For citation: Evdokimova O. V., Babeshko V. A., Pavlova A. V., Evdokimov V. S., Babeshko O. M. About one new precursor of increased seismicity. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (4): 47-58. DOI: 10.46698/VNC.2022.80.98.004.

Введение

В настоящей работе, используя разработанный авторами новый универсальный метод моделирования [Babeshko et al., 2021], позволяющий исследовать граничные задачи для сред сложной реологии путем разложения их по решениям более простых граничных задач, в частности, для уравнений Гельмгольца.

В связи с этим, оказалось возможным выявлять новые свойства, явления и процессы, описываемые решениями сложных граничных задач, путем изучения более простых. В дальнейшем, в рамках указанных разложений, изучаются упрощенные граничные задачи, и выявленные свойства могут переноситься, посредством разложений, на случаи исследования граничных задач для сложных материалов. К числу таких свойств относится выявление резонансов в контактных задачах для деформируемых штампов, лежащих на многослойном основании. Именно этот подход был использован при изложении теории деформируемых штампов в работе [Бабешко и др., 2022]. В работе авторов [Бабешко и др., 2022б] достаточно подробно описан взгляд выдающихся ученых – геофизиков академиков Г. А. Гамбурцева [Гамбурцев, 1982] и М. А. Садовского [Садовский и др., 1987] на необходимость привлечения к прогнозным исследованиям в сейсмологии методов механики, теории прочности и разрушения, учета блочного строения коры Земли. Особо отметим высказывание Г. А. Гамбурцева «Изыскание методов прогноза времени землетрясений следует направить в первую очередь в сторону поиска механических предвестников землетрясений. Такие поиски могут быть успешными только в том случае, если они будут основываться на глубоком изучении всех деталей механизма быстрых и медленных движений блоков земной коры сейсмоактивных районов». Следуя наставлениям великих ученых, в настоящей работе авторы рассматривают еще один возможный механический подход к проблеме оценки сейсмичности. Он основан на развиваемой в последнее время теории контактных задач с деформируемым штампом, действующим на слоистую среду, в том числе, в динамическом режиме [Бабешко и др., 2022а]. Уместно отметить, что этот подход позволил обнаружить и описать стартовые землетрясения, возникающие до взаимодействия сблизившихся литосферных плит торцами [Бабешко и др., 2022б]. В том же случае, когда литосферные плиты сблизались и начинают взаимодействовать торцами, то в литосферных плитах возникает коровое землетрясение, достаточно подробно описанное в [Певнев, 2003]. Следуя механике прочности и разрушения [Бабешко и др., 2022а], можно ожидать еще один процесс, способствующий подготовке землетрясений, резонансный, которому посвящена настоящая статья.

Он возможен в автономной литосферной плите или ее фрагменте при условии, что на нее оказывается гармоническое воздействие, и она ограничена хотя бы в одном направлении. Возможность совершения колебательных движений литосферными плитами описана в ряде публикаций, где решающую роль играют приливные эффекты, вызываемые притяжением Луны. Так, в монографии [Ферронский, 2007 и др.], в разделе «Приливное взаимодействие тел», говорится: «Поскольку верхняя оболочка Земли относительно Луны вращается быстрее, лицевой приливный горб оказывается впереди движения планеты. Мы воспринимаем приливы умозрительно, как эффекты притяжения Луны». В разделе «Природа землетрясений, горообразования и вулканизма» говорится: «В данном случае речь идет о развитии новых подходов к пониманию и прогнозу ряда природных явлений, имеющих жизненно важное значение. Такими явлениями в первую очередь являются колебания земной

коры и землетрясения...». В разделе «Колебания земной коры и землетрясения» говорится: «Сейсмические станции мира, расположенные в разных географических пунктах, постоянно регистрируют сотни тысяч упругих, в основном, слабых колебаний поверхности Земли в год». Также приводится общепризнанный механизм землетрясения. «Для объяснения механизма явления полагают, что в объеме тела, в пределах которого происходит процесс, называемый очагом, высвобождается накопленная за некоторое время энергия. Высвобождение энергии сопровождается разрывом геологической структуры, который сопровождается мгновенным перемещением масс». Этот вопрос исследован и в работе [Заалишвили и др., 2021], где выявлены даже нелинейные колебания грунтов. Следует упомянуть многочисленные предвестники землетрясений, а также подходы и методы, изложенные в работах [Чернов., 1987; Lu, 2007 и др.; Chernov et al., 2020; Xia et al., 2004, 2005; Geller, 1997; Kagan, 1997; Keer, 1979; Main et al., 1989; Mogi, 1967; Scholz et al., 2005; Wyss, 1991; Atkinson, 1981; Mitchell et al., 2013, 2015; Di Toro, 2011; и другие], каждая из которых несомненно представляет интерес.

Объединяя все сказанное, в данной работе исследуется возможное влияние колебаний литосферных плит или их фрагментов на подготовку условий для возникновения очага землетрясений. Возможность существования еще одного механического эффекта, способного повлиять на уровень сейсмичности территории, порождает эффект возникновения резонансов в контактных задачах с деформируемым штампом. Этот подход уже изучался в предыдущей статье авторов [Бабешко и др., 2022б], однако там рассматривались полубесконечные литосферные плиты. Упомянутый резонанс возникает в тех случаях, когда хотя бы в одном направлении литосферная плита является ограниченной. Такой, является, например, бесконечная полоса, ограниченной ширины. Впервые существование дискретного спектра в задачах теории упругости для неоднородной полосы, приводящее к резонансу, было обнаружено академиком И. И. Воровичем [Ворович, 1979а, б]. Полоса становится неоднородной, если на нее действует деформируемый штамп. В контактных задачах с абсолютно твердым штампом подобное явление не наблюдается.

В настоящей работе следуем в значительной степени публикации авторов [Бабешко и др., 2022а], применяя математический метод для решения актуальной проблемы сейсмологии. В связи с этим опускаются многие математические выкладки указанной работы. Однако, используемый метод дополняется пояснениями и параметрами, делающими абстрактное изложение работы применимым для целей геофизики. В работе [Бабешко и др., 2022а], акцент был поставлен на доказательство корректности поставленной контактной задачи о действии деформируемого штампа на деформируемую слоистую среду. Применяемый при этом метод блочного элемента привел к необходимости определения функционалов от искомого решения. Доказана возможность их определения и выписаны соотношения, которым они удовлетворяют. Однако дальнейший анализ полученного решения этой задачи показал, что эти соотношения в задачах о колебаниях деформируемых штампов описывают резонансные частоты, существование которых теоретически было доказано академиком И. И. Воровичем. Возможности применения этих резонансных явлений в задачах сейсмологии посвящена настоящая работа.

Авторы рассматривают результаты применения механических подходов как дополнение к работам геофизиков, опубликовавших прекрасный материал в многочисленных работах, и находят целесообразным дальнейшее совместное изучение степени полезности получаемых результатов.

Постановка задачи

Рассматривается многослойная среда, на ее верхней границе вводится декартова система координат таким образом, что ось ox_3 направлена по внешней нормали, остальные оси ox_1 , ox_2 лежат в касательной плоскости. Предполагается, что в области полосы $W(-B \leq x_1 \leq B, |x_2| \leq \Gamma)$ расположена деформируемая литосферная плита, представляющая собой деформируемый штамп. На них оказываются внешние воздействия в виде гармонических колебаний, описываемые функцией $e^{-i\omega t}$. Здесь ω – частота гармонических воздействий, t – параметр времени. С учетом применения нового универсального метода моделирования [Бабешко и др., 2021], можно рассматривать плиту и штамп как объекты, состоящие из материалов сложной реологии. Однако, поскольку решения граничных задач для тел сложной реологии могут быть разложены по решениям граничных задач для уравнений Гельмгольца, в случае гармонических колебаний, то достаточно рассматривать граничную задачу для деформируемого штампа, описываемую этим уравнением.

Следуя [Ворович, Бабешко, 1997 и др.], будем считать, что штамп без трения в зоне контакта воздействует на основание. Тогда интегральные уравнения такой смешанной задачи можно записать в форме:

$$\int_{-B}^B \int_{-B}^B k(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) q(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 = f(x_1, x_2), \quad -B \leq x_1 \leq B, |x_2| \leq \infty$$

$$k(x_1, x_2) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K(\alpha_1, \alpha_2) e^{-i(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2)} d\alpha_1 d\alpha_2 \quad (1)$$

Следуя общепринятым обозначениям, имеем для функций $q(x_1, x_2)$, $f(x_1, x_2)$, $k(x_1, x_2)$, $K(x_1, x_2)$ обозначения контактных напряжений под штампом, – перемещений в зоне контакта, ядра интегрального уравнения, преобразования Фурье ядра интегрального уравнения. Таким образом, сформировалась контактная задача механики с деформируемым штампом, теории решения которой в настоящее время нет. Применяемые численные методы не позволяют выявлять в общем виде ряд важных явлений, возникающих в этих задачах. Их эффективность снижается в связи с неограниченностью области задания уравнений.

На рисунках 1 и 2 представлены достаточно удаленные, благодаря сквозному разлому, литосферные плиты, напряжения в которых вычислены программой COMSOL. Можно видеть автономность литосферных плит при широком разломе. На краях области контакта можно наблюдать концентрацию напряжений, описываемую известными в контактных задачах функциями $(B^2 - x^2)^{-1/2}$. Однако, из результатов численного анализа невозможно извлечь данные о резонансе и наличии новых дискретных спектров, возникающих в системе литосферная плита – деформируемое основание. Этот результат получается пока только аналитически, посредством привлечения нового универсального метода моделирования [Бабешко и др., 2021].

Для решения подобных задач в [Бабешко и др., 2021], разработан достаточно универсальный метод, применяемый как к граничным задачам для дифференциальных уравнений в частных производных, так и к некоторым типам интегральных уравнений. В методе используются упакованные блочные элементы, теория которых построена раньше и опубликована в многочисленных работах. В этой работе показано, что упакованные блочные элементы идентичны «фракталам» – самоподобным элементам, введенным американским математиком Б. Мандельбротом.

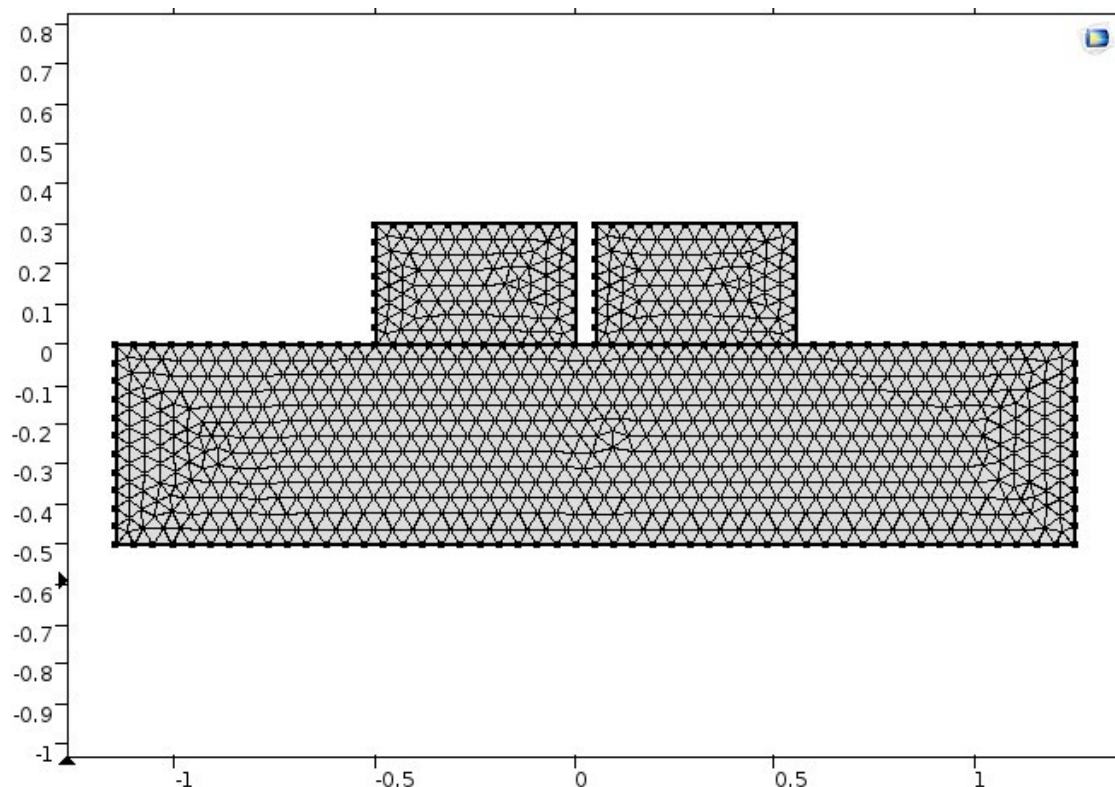


Рис. 1. Сетка для метода конечных элементов при численном расчете пакетом программ COMSOL концентрации напряжений в двух блоках-моделях литосферных плит на деформируемом основании /

Fig. 1. Grid for the finite element method in the numerical calculation by the COMSOL software package of stress concentration in two blocks – models of lithospheric plates on a deformable foundation

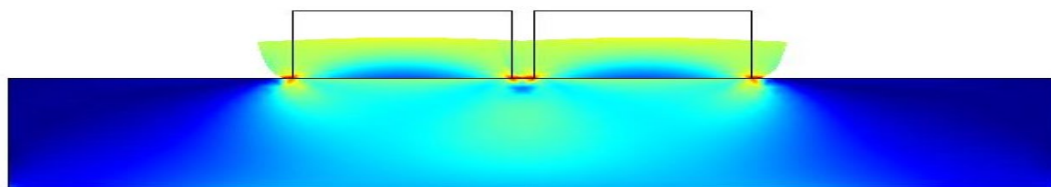


Рис. 2. Результат численного расчета концентрации напряжений в двух блоках на деформируемом основании. По краям видны концентрации контактных напряжений /

Fig. 2. The result of a numerical calculation of the stress concentration in two blocks on a deformable foundation. Concentrations of contact stresses are visible along the edges

В соответствии с методом работы [Бабешко и др., 2021], необходимо построить в области $W(-B, B) \times (-1, 1)$, $B \gg 1$ фракталы – упакованные блочные элементы, которые будут рассматриваться как деформируемые штампы. В соответствии с описанным выше, рассматривается двумерное уравнение Гельмгольца в указанной области:

$$[\partial^2 x_1 + \partial^2 x_2 + p^2] \varphi(x_1, x_2) = g(x_1, x_2), \quad g(x_1, x_2) = q(x_1, x_2) - t(x_1, x_2). \quad (2)$$

В этом уравнении принято вертикальное перемещение в зоне контакта – $\varphi(x_1, x_2)$, а контактные напряжения, действующие на объект снизу, которые надо определить, обозначены $q(x_1, x_2)$. Заданное внешнее давление сверху на объект –

$t(x_1, x_2)$. Также задаются граничные условия. Они имеют в области $W(-B \leq x_1 \leq B)$ представление:

$$\varphi(x_1, x_2) = \varphi(-B, x_2), \quad x_1 \rightarrow -B; \quad \varphi(x_1, x_2) = \varphi(B, x_2), \quad x_1 \rightarrow B;$$

Построение интегральных уравнений

Будем использовать один из многочисленных подходов построения и преобразования интегральных уравнений, например, изложенных в [Achenbach, 1973].

Рассматриваемая, двумерная задача применением преобразования Фурье по координате x_2 сводится к одномерному уравнению. Оно содержит свободный вещественный параметр α_2 . Интегральное уравнение (1) принимает форму:

$$\int_{-B}^B k_0(x_1 - \xi_1) q(\xi_1) d\xi_1 = f(x_1), \quad q(\xi_1) = q(\xi_1, \alpha_2), \quad k_0(x_1) = k(x_1, \alpha_2)$$

$$k_0(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_0(\alpha_1) e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1, \quad K_0(\alpha_1) = K(\alpha_1, \alpha_2), \quad K_0(\alpha_1) = P_0^{-1}(\alpha_1) R_0(\alpha_1) \quad (3)$$

Ниже считаем, что функция $K_0(\alpha_1)$ является четной, мероморфной. На бесконечности имеет поведение $K_0(\alpha_1) = O(\alpha_1^{-1})$, $\text{Im } \alpha_1 = 0$.

Функция $K_0(\alpha_1)$ может быть представлена как отношение двух целых функций $R_0(\alpha_1)$ и $P_0(\alpha_1)$. Их счетные множества нулей, уходят на бесконечность концентрируясь в окрестностях мнимых осей.

Примеры подобных смешанных задач, имеются в [Ворович, Бабешко, 1997 и др.] и других публикациях.

С учетом принятого, становятся одномерными граничные задачи (2) для блочного элемента

$$(\partial^2 x_1 + k^2) \varphi(x_1) = g(x_1), \quad g(x_1) = q(x_1) - t(x_1), \quad k^2 = p^2 - \alpha_2^2$$

$$\varphi(x_1) = \varphi(x_1, \alpha_2), \quad g(x_1) = g(x_1, \alpha_2),$$

$$\varphi(x_1, \alpha_2) = \varphi(A), \quad x_1 \rightarrow A, \quad x_1 \in \Omega_1;$$

$$\varphi(x_1, \alpha_2) = \varphi(-B), \quad x_1 \rightarrow -B; \quad \varphi(x_1, \alpha_2) = \varphi(B), \quad x_1 \rightarrow B, \quad x_1 \in \Omega_2; \quad (4)$$

Метод исследования

В дальнейшем, рассматриваем упрощенный случай литосферной плиты в полосе $W(-B \leq x_1 \leq B, |x_2| \leq \Gamma)$, $B \gg 1$, полагая, что ее свойства не изменяются вдоль координаты x_2 . В этом случае имеет место значение параметров $k = p = c\omega$. Здесь постоянный параметр c зависит от свойств материала плиты.

Метод блочного элемента [Бабешко и др., 2022a] после применения к (4) дает выражения для упакованных блочных элементов. Входящая в них внешняя форма $\omega_B(\alpha_1)$ имеет представление:

$$\omega_B(\alpha_1) = \Delta^{-1} \left\{ \left[e^{-i\alpha_1 B} 2ik(e^{i(\alpha_1 - k)2B} - 1) + i(\alpha_1 - k)e^{i\alpha_1 B} \right] \varphi_B(B) + \right.$$

$$\left. + \left[e^{i\alpha_1 B} 2iz(-e^{-i(\alpha_1 - k)2B} + 1) + i(\alpha_1 - k)e^{-i\alpha_1 B} \right] \varphi_B(-B) + \right.$$

$$\left. + G_B(k)(-e^{i(\alpha_1 + k)B} + e^{-i(\alpha_1 + k)B}) + G_B(-k)(e^{i(\alpha_1 - k)B} - e^{-i(\alpha_1 - k)B}) \right\} - G_B(\alpha_1), \quad \Delta = -2i \sin k2B$$

$$G_B(\alpha_1) = \int_{-B}^B g_B(x_1) e^{i\alpha_1 x_1} d\alpha, \quad Q_B(\alpha_1) = \int_{-B}^B q_B(x_1) e^{i\alpha_1 x_1} d\alpha_1, \quad T_B(\alpha_1) = \int_{-B}^B t_B(x_1) e^{i\alpha_1 x_1} d\alpha_1, \quad \omega_B(\pm k) = 0$$

Выражение для упакованных блочных элементов принимает интегральное представление:

$$\varphi_B(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega_B(\alpha)}{\alpha^2 - k^2} e^{-i\alpha x_1} d\alpha, \quad (5)$$

Приравняв перемещения $f_B(x_1)$ в зоне контакта (3) перемещениям блочного элемента $\varphi_B(x_1)$ (5), после применения преобразования Фурье, получим

$$K_0(\alpha_1)Q_B(\alpha_1) + E_B(\alpha_1) = -(\alpha_1^2 - k^2)^{-1}Q_B(\alpha_1) + S_B(\alpha_1) \\ S_B(\alpha_1) = (\alpha_1^2 - k^2)^{-1} \langle \omega_B(\alpha_1) + Q_B(\alpha_1) \rangle$$

Здесь $E_B(\alpha_1)$ свободная от контакта часть поверхности. После применения к соотношению обращения Фурье по параметру α_1 , будем иметь интегральное уравнение Винера-Хопфа на отрезке вида:

$$\int_{-B}^B k(x_1 - \xi_1) q_B(\xi_1) d\xi_1 = s_B(x_1), \quad -B \leq x_1 \leq B \\ k(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(\alpha_1) e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1, \quad K(\alpha_1) = K_0(\alpha_1) + (\alpha_1^2 - k^2)^{-1} \quad (6)$$

В правой части уравнения появляются неизвестные функционалы $Q_B(k)$, $Q_B(-k)$ от решений интегральных уравнений. Они находятся с помощью обращения интегральных уравнений. Это одна из особенностей таких контактных задач.

В случае жестких штампов такие функционалы не возникают. Именно, определение перечисленных функционалов, зависящих от частоты, привело к получению соотношений, определяющих резонансные частоты в контактных задачах с деформируемым штампом.

Опуская метод решения интегрального уравнения (6), детально изложенный в работе [Бабешко и др., 2022а], приведем представление контактных напряжений под литосферной плитой и соотношение, позволяющее вычислять резонансные частоты для деформируемой литосферной плиты, которые могут инициировать землетрясения.

Результаты работы и их обсуждение

Решение при больших $B \gg 1$ с учетом обозначений статьи имеет вид:

$$Q_B(\alpha_1) = Q_1(\alpha_1) + Q_2(\alpha_1) + Q_3(\alpha_1) + S_{0B}(\alpha_1).$$

Здесь обозначено:

$$Q_1(\alpha_1) = -\langle Q_B(k) \sin(\alpha_1 + k)B + Q_B(-k) \sin(\alpha_1 - k)B \rangle 2iM_1(\alpha_1) \\ Q_2(\alpha_1) = \langle Q_B(k) \{ M_3(\alpha_1) \sin(\alpha_1 + k)B \}^+ + Q_B(-k) \{ M_3(\alpha_1) \sin(\alpha_1 - k)B \}^+ \rangle 2i(\alpha_1 - k)M_2(\alpha_1) \\ Q_3(\alpha_1) = \langle Q_B(k) \{ M_5(\alpha_1) \sin(\alpha_1 + k)B \}^- + Q_B(-k) \{ M_5(\alpha_1) \sin(\alpha_1 - k)B \}^- \rangle 2i(\alpha_1 + k)M_4(\alpha_1) \\ M_1(\alpha_1) = \frac{P_{0-}(\alpha_1) P_{0+}(\alpha_1)}{R_-(\alpha_1) R_+(\alpha_1)}, \quad M_2(\alpha_1) = \frac{(\alpha_1 - k)P_{0-}(\alpha_1)e^{i\alpha_1 B}}{R_-(\alpha_1)}, \quad M_3(\alpha_1) = \frac{P_{0+}(\alpha_1)e^{-i\alpha_1 B}}{R_+(\alpha_1)(\alpha_1 - k)}, \\ M_4(\alpha_1) = \frac{(\alpha_1 + k)P_{0+}(\alpha_1)e^{-i\alpha_1 B}}{R_+(\alpha_1)}, \quad M_5(\alpha_1) = \frac{P_{0-}(\alpha_1)e^{i\alpha_1 B}}{R_-(\alpha_1)(\alpha_1 + k)}$$

После вычисления получаем значения функционалов в форме

$$\begin{aligned} Q_B(k) &= \Delta_B^{-1} [S_{0B}(-k)C_{13}(k) - S_{0B}(k)D_{22}(-k)], \quad Q_B(-k) = \Delta_B^{-1} [S_{0B}(-k)D_{11}(k) + S_{0B}(k)C_{23}(-k)] \\ \Delta_B(k) &= D_{11}(k)D_{22}(-k) - C_{13}(k)C_{23}(-k) \end{aligned}$$

Соотношение, позволяющее вычислять резонансные частоты, при которых решение обращается в бесконечность, имеет вид:

$$\Delta_B = D_{11}(k)D_{22}(-k) - C_{13}(k)C_{23}(-k) = 0.$$

Значения всех функций и применяемых операторов либо детально описаны в [Бабешко и др., 2022а], либо указан способ их построения. Функции $C_{m,n}(k)$, $D_{m,n}(k)$, $\Delta_B(k)$ существуют и выражаются через введенные функции M_r , $r = 1, 2, \dots, 5$.

Решение интегрального уравнения, после внесения функционалов, принимает вид:

$$q_B(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Q_B(\alpha_1) e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1.$$

Построенное решение задачи для полосовой литосферной плиты, имеет резонанс в связи с конечной ее шириной. В том случае, если литосферная плита будет иметь полубесконечную форму, подобного неограниченного резонанса не будет, но может быть с конечной амплитудой.

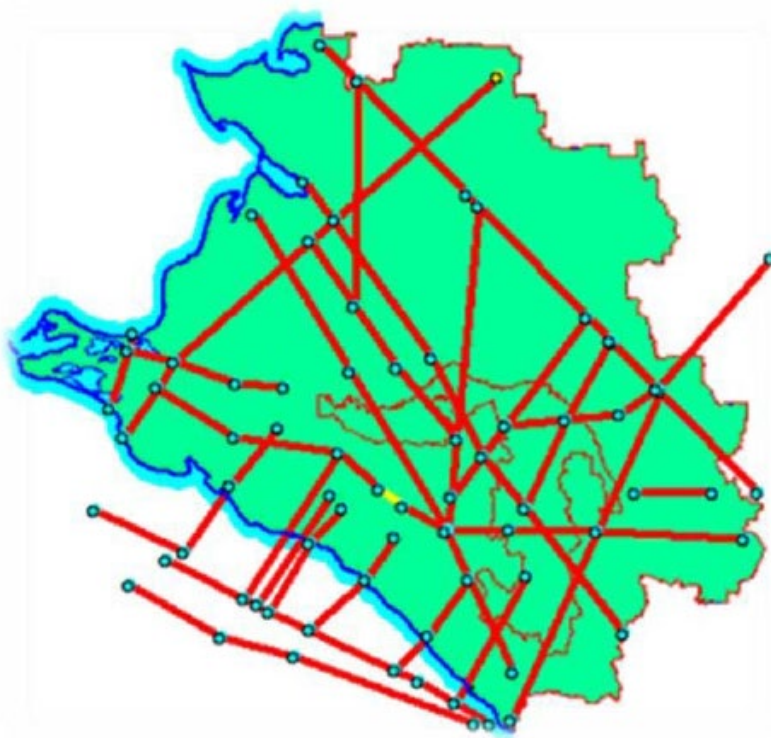


Рис. 3. Фрагменты литосферной плиты на территории Краснодарского края, отделенные разломами /
Fig. 3. Fragments of the lithospheric plate on the territory of the Krasnodar Territory, separated by faults

Выводы

Таким образом, с учетом упомянутых во введении важных исследований ученых, обнаруживших колебательные процессы в литосферных плитах, а также естественного влияния периодических приливных процессов от притяжения Луны, с помощью математического моделирования, удалось выявить возможность резонансных процессов в литосферных плитах. Они, по-видимому, могут влиять на возрастание сейсмичности, побуждать возникновение сейсмических событий.

В случае ограниченных плит возможны более интенсивные резонансные процессы, в случае неограниченных, то есть протяженных, резонансные процессы будут слабее.

На рисунке 3 приведены разломы на территории Краснодарского края, которые делят литосферную плиту региона на фрагменты. Каждый из них может испытывать в той или иной мере воздействие дискретных резонансов, описанных выше, в связи с приливными воздействиями Луны, приводящими к медленным колебаниям литосферных плит.

Литература

1. Бабешко В. А., Евдокимова О. В., Бабешко О. М. О контактных задачах с деформируемым штампом. // Проблемы прочности и пластичности. – 2022а. – Т. 84. № 1. – С. 25-34. DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-1-25-34
2. Бабешко В. А., Евдокимова О. В., Бабешко О. М., Евдокимов В. С. Об определении механического состояния тектонических разломов. // Геология и геофизика Юга России. – 2022б. – Т. 12 (2). – С. 53-66. DOI: 10.46698/VNC.2022.75.85.004
3. Ворович И. И. Спектральные свойства краевой задачи теории упругости для неоднородной полосы. // Доклады АН СССР. – 1979а. – Т. 245. № 4. – С. 817-820.
4. Ворович И. И. Резонансные свойства упругой неоднородной полосы. // Доклады АН СССР. – 1979. – Т. 245. № 5. – С. 1076-1079.
5. Гамбурцев Г. А Перспективный план исследований по проблеме «Изыскание и развитие прогноза землетрясений». // Развитие идей Г. А. Гамбурцева в геофизике. – М.: Наука, 1982. – С. 304-311.
6. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Габараев А. Ф., Мерзликин Т. И. Нелинейные колебания грунтовой толщи по инструментальным и численным данным. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11 (4). – С. 70-82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006
7. Певнев А. К. Пути к практическому прогнозу землетрясений. – М.: ГЕОС, 2003. – 154 с.
8. Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М.: Наука, 1987. – 104 с.
9. Ферронский В. И., Ферронский С. В. Динамика Земли. – М.: Научный мир, 2007. – 336 с.
10. Чернов Ю. К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической оценки территории. – Ташкент: Фан, 1989. – 296 с.
11. Achenbach J. D. Wave propagation in Elastic Solids. // North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics. – 1973. – p. 480
12. Atkinson B. Earthquake prediction. // Phys. Technol. – 1981. – Vol. 12. No. 2. – pp. 60-68.
13. Babeshko V. A., Evdokimova O. V., Babeshko O. M. Fractal properties of block elements and a new universal modeling method. // Doklady Physics. – 2021. – Vol. 66. No. 8. – pp. 218-222. DOI: 10.1134/S1028335821080012
14. Chernov Yu. K., Zaalishvili V. B., Chernov A. Yu. Strong ground motion simulation for forecasting the probable seismic impacts in the territory of the Republic of North Ossetia-Alania.

// *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 2020. – Vol. 56. No. 5. – pp. 644-655. DOI: 10.1134/S1069351320050018

15. Di Toro G. Fault lubrication during earthquake. // *Nature*. – 2011. – Vol. 471 (7339). – pp. 494-498.

16. Geller R. J. Earthquake prediction: A critical review. // *J. Intern.* – 1997. – Vol. 131. – pp. 425-450.

17. Kagan Y. Y. Are earthquake predictable? // *J. Intern.* – 1997. – Vol. 131. – pp. 505-525.

18. Keer R. Earthquake prediction: Mexican quake shows one way to look for the big ones. // *Science*. – 1979. – Vol. 203. No. 4383. – pp. 860-862.

19. Lu X., Lapusta N., Rosakis A. J. Pulse-like and crack-like ruptures in experiments mimicking crustal earthquakes. // *PNAS*. – 2007. – Vol. 104. – pp. 18931-18936.

20. Main I. G., Meredith P. G. Classification of earthquake precursors from a fracture mechanics model. // *Tectonophysics*. – 1989. – Vol. 167. – pp. 273-283.

21. Mitchell E., Fialko Y., Brown K. Temperature dependence of frictional healing of westerly granite: Experimental observations and numerical Simulations. // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2013. – Vol. 14. – pp. 567-582.

22. Mitchell E., Fialko Y., Brown K. Frictional properties of gabbro at conditions corresponding to slow slip events in subduction zones. // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2015. – Vol. 16. – pp. 4006-4020.

23. Mogi K. Earthquake and fracture. // *Tectonophysics*. – 1967. – Vol. 5. No. 1. – pp. 35-55.

24. Scholz C. H., Sykes L. R., Aggarwal Y. P. Earthquake prediction- a physical basis. // *Science*. 1973. – 2005. – Vol. 181. No. 4102. – pp. 803-809.

25. Wyss M. Evaluation of proposed earthquake precursors. // *Wash. (DC): Amer. Geophys. Union*. – 1991.

26. Xia K., Rosakis A. J., Kanamori H. Laboratory Earthquakes. The Sub-Rayleigh-to-Supershear Rupture Transition. // *Science*. – 2004. – Vol. 303. – pp. 1859-1861.

27. Xia K., Rosakis A. J., Kanamori H., Rice J. R. Laboratory Earthquakes Along Inhomogeneous Faults. Directionality and Supershear. // *Science*. – 2005. – Vol. 308. – pp. 681-684.

References

1. Babeshko V. A., Evdokimova O. V., Babeshko O. M. On contact problems with deformable stamp. Problems of strength and plasticity. 2022a. Vol. 84. No. 1. pp. 25-34. DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-1-25-34 (In Russ.)

2. Babeshko V. A., Evdokimova O. V., Babeshko O. M., Evdokimov V. S. Determination of the mechanical state of tectonic faults. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022b. Vol. 12 (2). pp. 53-66. DOI: 10.46698/VNC.2022.75.85.004 (In Russ.)

3. Vorovich I. I. Spectral properties of the boundary value problem of elasticity theory for an inhomogeneous strip. Reports of the ANSSR. 1979a. Vol. 245. No. 4. pp. 817-820. (In Russ.)

4. Vorovich I. I. Resonance properties of an elastic inhomogeneous band. Reports of the ANSSR. 1979b. Vol. 245. No. 5. pp. 1076-1079. (In Russ.)

5. Vorovich I. I., Babeshko V. A. Dynamic mixed problems of elasticity theory for non-classical regions. Moscow. Nauka. 1979. 320 p. (In Russ.)

6. Gamburtsev G. A. Perspective plan of research on the problem “Research and development of earthquake forecast”. In: Development of the G. A. Gamburtsev’s Ideas in Geophysics. Moscow. Nauka. 1982. pp. 304-311. (In Russ.)

7. 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 (4). 70-82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006 (in Russ.)

8. Pevnev A. K. Ways to practical earthquake prediction. Moscow. GEOS. 2003. 154 p. (in Russ.)

9. Sadovsky M.A., Bolkhovitinov L.G., Pisarenko V.F. Deformation of the geophysical environment and the seismic process. Moscow. Nauka. 1987. 104 p. (in Russ.)
10. Ferronsky V.I., Ferronsky S.V. Earth dynamics. Moscow. Nauchnyi mir. 2007. 336 p. (in Russ.)
11. Chernov Yu.K. Strong ground motions and quantification of the seismic assessment of the territory. Tashkent. Fan. 1989. 296 p. (in Russ.)
12. Atkinson B. Earthquake prediction. *Phys. Technol.* 1981. Vol. 12. No. 2. pp. 60-68.
13. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. Fractal properties of block elements and a new universal modeling method. *Doklady Physics*. 2021. Vol. 66. No. 8. pp. 218-222. DOI: 10.1134/S1028335821080012
14. Chernov Yu.K., Zaalishvili V.B., Chernov A.Yu. Strong ground motion simulation for forecasting the probable seismic impacts in the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2020. Vol. 56. No. 5. pp. 644-655. DOI: 10.1134/S1069351320050018
15. Di Toro G. Fault lubrication during earthquake. *Nature*. 2011. Vol. 471 (7339). pp. 494-498.
16. Geller R. J. Earthquake prediction: A critical review. *J. Intern.* 1997. Vol. 131. pp. 425-450.
17. Kagan Y. Y. Are earthquake predictable? *J. Intern.* 1997. Vol. 131. pp. 505-525.
18. Keer R. Earthquake prediction: Mexican quake shows one way to look for the big ones. *Science*. 1979. Vol. 203. No. 4383. pp. 860-862.
19. Lu, X., Lapusta N., Rosakis A.J. Pulse-like and crack-like ruptures in experiments mimicking crustal earthquakes. *PNAS*. 2007. Vol. 104. pp. 18931-18936.
20. Main I.G., Meredith P.G. Classification of earthquake precursors from a fracture mechanics model. *Tectonophysics*. 1989. Vol. 167. pp. 273-283.
21. Mitchell E., Fialko Y., Brown K. Temperature dependence of frictional healing of westerly granite: Experimental observations and numerical Simulations. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2013. Vol. 14. pp. 567-582.
22. Mitchell E., Fialko Y., Brown K. Frictional properties of gabbro at conditions corresponding to slow slip events in subduction zones. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2015. Vol. 16. pp. 4006-4020.
23. Mogi K. Earthquake and fracture. *Tectonophysics*. 1967. Vol. 5. No. 1. pp. 35-55.
24. Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction- a physical basis. *Science*. 1973. 2005. Vol. 181. No. 4102. pp. 803-809.
25. Wyss M. Evaluation of proposed earthquake precursors. Wash. (DC): Amer. Geophys. Union. 1991.
26. Xia K., Rosakis A.J., Kanamori H. Laboratory Earthquakes. The Sub-Rayleigh-to-Supershear Rupture Transition. *Science*. 2004. Vol. 303. pp. 1859-1861.
27. Xia K., Rosakis A.J., Kanamori H., Rice J.R. Laboratory Earthquakes Along Inhomogeneous Faults. Directionality and Supershear. *Science*. 2005. Vol. 308. pp. 681-684.

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.3

DOI: [10.46698/VNC.2022.44.93.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.44.93.005)

Оригинальная статья

Моделирование гравитационного поля систем разломов и зон трещиноватости

И. А. Керимов 

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Россия, 123242, г. Москва, ул.
Б. Грузинская, д. 10, стр. 1, e-mail: kerimov@ifz.ru

Статья поступила: 31.10.2022, доработана: 25.11.2022, одобрена в печать: 01.12.2022

Резюме: Актуальность работы. Разработка новых и совершенствование существующих методов интерпретации геофизических данных с целью прогнозирования неструктурных ловушек нефти и газа, обусловленных разломно-блоковой тектоникой, является весьма актуальной задачей многих нефтегазовых регионов, в т. ч. и Предкавказья. **Цель работы.** Решение прямой задачи гравиметрии для геолого-гравиметрических моделей, представляющих собой систему разноориентированных линейных блоков и зон повышенной трещиноватости. Определение оптимальных методов трансформации исходного гравиметрического поля и морфометрического анализа рельефа для выделения систем разломов и линейных зон повышенной трещиноватости для геологических условий Предкавказья. **Методы исследования.** Создание геолого-гравиметрических моделей разломно-блоковой среды, соответствующих разломно-блоковой структуре Терско-Сунженской антиклинальной зоны. Разработка алгоритмов и программ расчета поля силы тяжести и ее производных, основанные на методах В. Н. Страхова решения прямых задач гравиметрии для элементов полей от типовых аппроксимирующих тел. Тестирование компьютерных программ и апробирование на модельных примерах. Обработка реальных гравиметрических данных с использованием компьютерных программ трансформации поля силы тяжести на основе метода F-аппроксимации. Построение карт вектора горизонтального градиента и третьей вертикальной производной силы тяжести, сопоставление результатов моделирования и фактических геолого-гравиметрических данных, определение признаков трассирования границ разломов и зон повышенной трещиноватости на картах трансформант гравитационного поля и уклона рельефа дневной поверхности. **Результаты исследования.** Созданы типовые геолого-плотностные модели для характерных структур разломно-блокового характера Терско-Сунженской антиклинальной зоны. Разработаны алгоритм и компьютерная программа вычисления элементов аномального гравитационного поля для системы разломов различной ориентировки линейных зон трещиноватости, основанные на идеях решения прямых задач гравиметрии и магнитометрии для элементов полей от типовых аппроксимирующих тел В. Н. Страхова. Выполнен расчет аномального гравитационного поля для различного типа моделей. Определены критерии выделения разломов и зон трещиноватости на морфометрических картах и картах высших производных гравитационного поля.

Ключевые слова: гравитационное поле, рельеф, моделирование, разломы, трещиноватость, F-аппроксимация, трансформации, уклон рельефа.

Для цитирования: Керимов И. А. Моделирование гравитационного поля систем разломов и зон трещиноватости. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (4): 59–71. DOI: [10.46698/VNC.2022.44.93.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.44.93.005).

GEOPHYSICS

DOI: [10.46698/VNC.2022.44.93.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.44.93.005)

Original paper

Modeling the gravitational field fault systems and fracture zones

I. A. Kerimov 

Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10/1 B. Gruzinskaya Str.,
Moscow 123995, Russian Federation, e-mail: kerimov@ifz.ru

Received: 03.11.2022, revised: 25.11.2022, accepted: 01.12.2022

Abstract: Relevance. The development of new and improvement of existing methods for interpreting geophysical data in order to predict non-structural oil and gas traps caused by fault-block tectonics is a very urgent task for many oil and gas regions, including Ciscaucasia. **Aim.** Solution of the direct problem of gravimetry for geological and gravimetric models, which are a system of differently oriented linear blocks and zones of increased fracturing. Determination of optimal methods for transforming the initial gravimetric field and morphometric analysis of the relief to identify fault systems and linear zones of increased fracturing for the geological conditions of Ciscaucasia. **Methods.** Creation of geological and gravimetric models of the fault-block environment, corresponding to the fault-block structure of the Terek-Sunzha anticline zone. Development of algorithms and programs for calculating the gravity field and its derivatives, based on V. Strakhov methods for solving direct problems of gravimetry for field elements from typical approximating bodies. Testing of computer programs and approbation on model examples. Processing of real gravimetric data using computer programs for the transformation of the gravity field based on the F-approximation method. Building maps of the horizontal gradient vector and the third vertical derivative of gravity, comparing the results of modeling and actual geological and gravimetric data, determining signs of tracing fault boundaries and zones of increased fracturing on maps of the gravity field transforms and the slope of the day surface topography. **Results.** Typical geological and density models have been created for the characteristic structures of the fault-block nature of the Terek-Sunzhensky anticline zone. An algorithm and a computer program for calculating the elements of an anomalous gravitational field for a system of faults of various orientations of linear zones of fracture, based on the ideas of solving direct problems of gravimetry and magnetometry for elements of fields from typical approximating bodies V. Strakhov. The anomalous gravitational field was calculated for various types of models. The criteria for identifying faults and fracture zones on morphometric maps and maps of higher derivatives of the gravitational field are determined.

Keywords: gravity field, relief, modeling, faults, fracturing, F-approximation, transformations, relief slope.

For citation: Kerimov I. A. Modeling the gravitational field fault systems and fracture zones. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (4): 59-71. DOI: 10.46698/VNC.2022.44.93.005.

Введение

В связи с сокращением запасов нефти и газа в мезозойских отложениях Северного Кавказа в последние годы весьма актуальным является поиск и разведка залежей УВ, приуроченных к неструктурным ловушкам в кайнозойских отложениях. Тектоника Северного Кавказа имеет сложный разломно-блоковый характер, ловушки УВ, в т. ч. неструктурные в большинстве случаев приурочены к зонам глубинных разломов [Летавин и др., 1987; Rogozhin et al., 2015]. Одним из перспективных направлений на территории Северного Кавказа являются зоны повышенной трещиноватости в верхних горизонтах осадочного чехла [Босиков и др., 2022; Хузин, 2012].

Основным инструментом изучения зон повышенной трещиноватости и связанных с этими зонами микросейсмичности являются геофизические методы [Zaalishvili et al., 2015, 2018]. Одним из эффективных способов прогнозирования зон трещиноватости является детальная гравиметрическая съемка. В связи с этим возникает необходимость совершенствования существующих и разработка новых методов интерпретации гравиметрических данных [Страхов, Керимов, 2001].

В настоящее время существует большое количество методов интерпретации гравитационного поля, большинство из них имеет различные ограничения [Давыденко, Парада, 2022; Долгаль, 2022; Петров, Трусов, 2000; Приезжаев, 2010; Hinze et al., 2014; Jacoby, Smilde, 2014]. Использование аппроксимационного подхода к спектральному анализу, основанного на методе линейных интегральных представлений В. Н. Страхова, позволяет устранить недостатки традиционных методов интерпретации [Страхов, Керимов, 2001; Керимов, 2003, 2009а, б].

Метод F-аппроксимации аномальных гравитационных и магнитных полей, разработанный в рамках метода линейных интегральных представлений В. Н. Страхова, полностью адекватен реальной геофизической практике и позволяет избавиться от различных идеализаций (идеализация плоского поля; идеализация границы раздела земля-воздух как бесконечной горизонтальной плоскости; идеализация непрерывного задания того или иного элемента поля на бесконечной горизонтальной плоскости или куске этой плоскости; идеализация задания того или иного элемента поля в узлах правильной геометрической сети и др.).

Методика исследования

Разработанный автором в рамках теории интегральных представлений метод F-аппроксимации позволяет принципиально по-новому решать ряд вопросов трансформации потенциальных полей, заданных на нерегулярной и разновысотной сети:

$$W_a(x) \quad x = (x_1, x_2, x_3) \quad (1)$$

Результаты работы и их обсуждение

Результаты апробирования метода на модельных и фактических геофизических данных, заданных на нерегулярной сети, позволили сделать вывод о высокой точности восстановления поля путем F-аппроксимации [Страхов, Керимов, 2001; Керимов, 2003, 2009а, б]. В практике гравиметрических исследований довольно широко используется метод пересчета исходного поля в высшие производные [Elkins, 2014; Hinze et al., 2014; Pasteka et al., 2014; Jacoby, Smilde, 2014].

Как показало моделирование аномального гравитационного поля системы разноориентированных разломов для их трассирования наиболее эффективно использование третьей вертикальной производной W_{zzz} потенциала силы тяжести. Ранее было получено выражение для первой вертикальной производной гравитационного потенциала для заданной произвольной по горизонтали и вертикали сети расчетных точек [Страхов, Керимов, 2001]:

$$W_z(\xi_{1,l}, \xi_{2,l}, \xi_{3,l}) = \frac{3}{2\pi} \sum_{k=1}^N \lambda_k \frac{(2z_{k,l}^2 - 3p_{k,l}^2) \cdot z}{(z_{k,l}^2 + p_{k,l}^2)^{\frac{7}{2}}}, \quad (2)$$

где λ_i – множители Лагранжа;

$$p_{k,l} = \sqrt{(x_{1,k} - \xi_{1,l})^2 + (x_{2,k} - \xi_{2,l})^2};$$

$$z_{k,l} = x_{3,k} + \xi_{3,l} + 2H.$$

Выражение для третьей вертикальной производной потенциала силы тяжести на основе F-аппроксимации выглядит следующим образом:

$$W_{zzz}(\xi_{1,l}, \xi_{2,l}, \xi_{3,l}) = \frac{75}{\pi} \sum_{k=1}^N \lambda_k \frac{z_{k,l}(8z_{k,l}^4 - 40\rho_{k,l}^2 z_{k,l}^2 + 15\rho_{k,l}^4)}{(z_{k,l}^2 + \rho_{k,l}^2)^{5.5}} \quad (3)$$

Данное выражение позволяет находить пространственное распределение W_{zzz} на основе F-аппроксимации в заданной сети расчетных точек (ξ_1, ξ_2, ξ_3) .

При F-аппроксимации рельефа земной поверхности принимается, что в N точках заданы (в декартовой системе координат $0XYZ$) приближенные значения высот $H_i^{(\delta)}$ некоторых точек (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, N$ [Керимов, 2009б].

Принимается, что:

$$H_i^{(\delta)} = H_i + \delta H_i, \quad (4)$$

где

H_i – точные значения высот,

$H_i^{(\delta)}$ – приближенные значения высот,

δH_i – погрешности в задании высот,

и что координаты (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, N$ заданы точно.

Тогда для линейной аппроксимации $\tilde{H}(x, y)$ имеем следующее явное аналитическое выражение в элементарных функциях:

$$\tilde{H}_j(x_j, y_j) = \frac{2\varepsilon}{\pi} \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{(4\varepsilon^2 + (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)^{1.5}} \quad (5)$$

где

λ_i – множители Лагранжа;

ε – погрешность аппроксимации.

Значение составляющих уклона рельефа, а также значения модуля и азимута вектора уклона рельефа можно определить по следующим формулам:

$$H_x(x_j, y_j) = \frac{6\varepsilon}{\pi} \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i(x_i - x_j)}{(4\varepsilon^2 + (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)^{2.5}} \quad (6)$$

$$H_y(x_j, y_j) = \frac{6\varepsilon}{\pi} \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i(y_i - y_j)}{(4\varepsilon^2 + (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)^{2.5}} \quad (7)$$

$$H_s = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \quad (8)$$

$$A_s = \arcsin(H_x / H_s) \quad (9)$$

На модельных и практических примерах показана эффективность решения на основе F-аппроксимации широкого круга важных практических задач:

- Восстановление значений потенциальных полей в узлах регулярной сети с учетом разновысотности исходных и результативных точек (3D интерполяция).
- Исключение искажающего влияния аномального вертикального градиента при пересчете наблюдаемого поля на горизонтальную плоскость или любую заданную поверхность.

- Фильтрация помех, нарушающих гармонический характер наблюдаемого потенциального поля.

В рамках теории метода F-аппроксимации разработаны алгоритмы и компьютерные технологии 3D трансформации (вычисление высших производных потенциальных полей, аналитическое продолжение в верхнее и нижнее полупространства элементов потенциальных полей, разделение аномальных полей). Также разработаны алгоритмы и компьютерные технологии F-аппроксимации рельефа земной поверхности, используемые для решения различных задач гравиметрии, магнитометрии, прикладной картографии, геоморфологии и др. На ряде реальных геолого-геофизических материалов оказана эффективность применения гравимагнитных

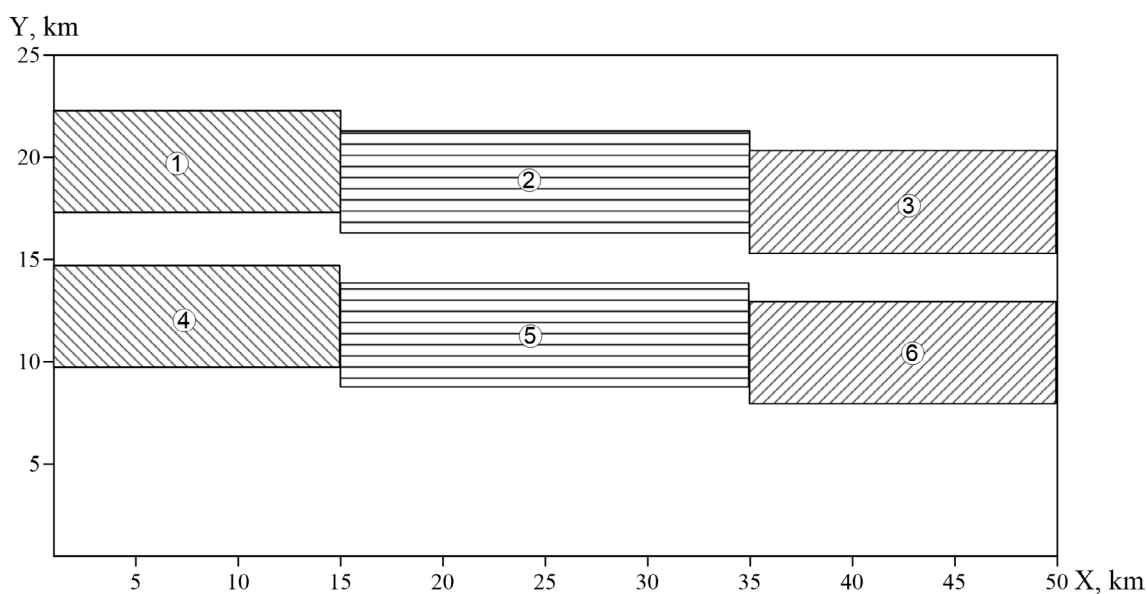


Рис. 1. Модель № 1. Схема расположения вертикальных призм /

Fig. 1. Model № 1. Layout plan of vertical prisms

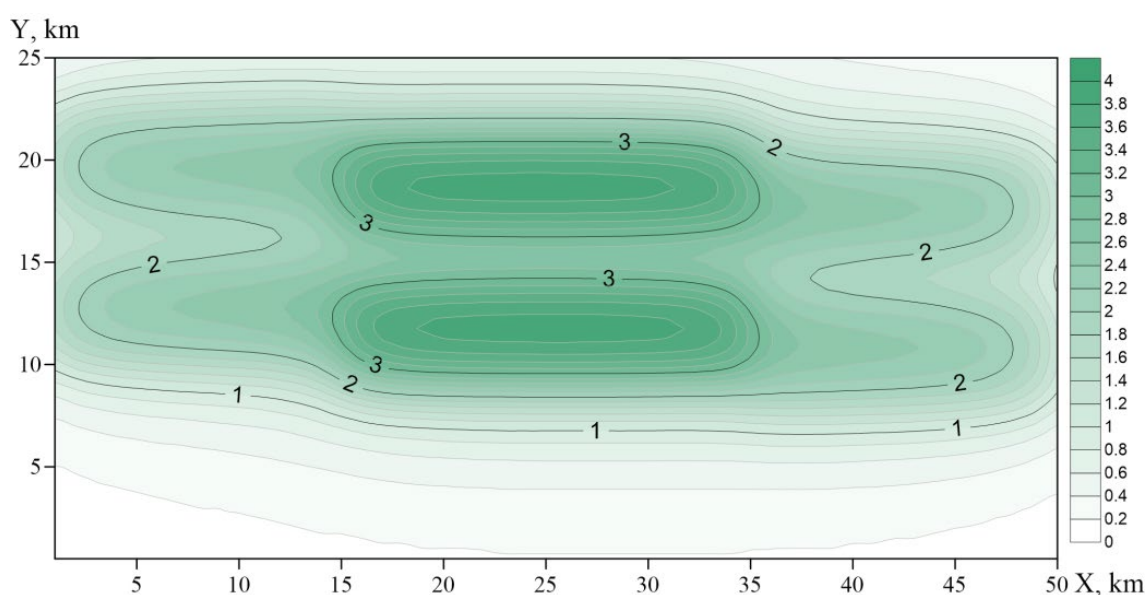


Рис. 2. Модель № 1. Карта аномального поля силы тяжести /

Fig. 2. Model № 1. Map of the anomalous gravity field

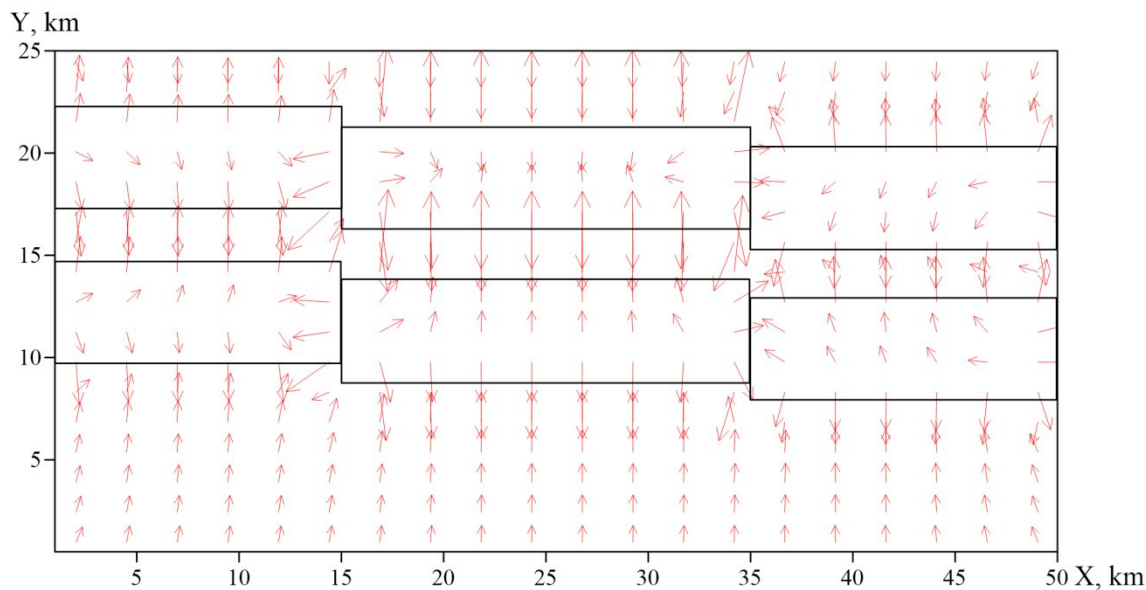


Рис. 3. Модель №1. Карта векторов горизонтального градиента силы тяжести /
Fig. 3. Model №1. Map of horizontal gravity gradient vectors

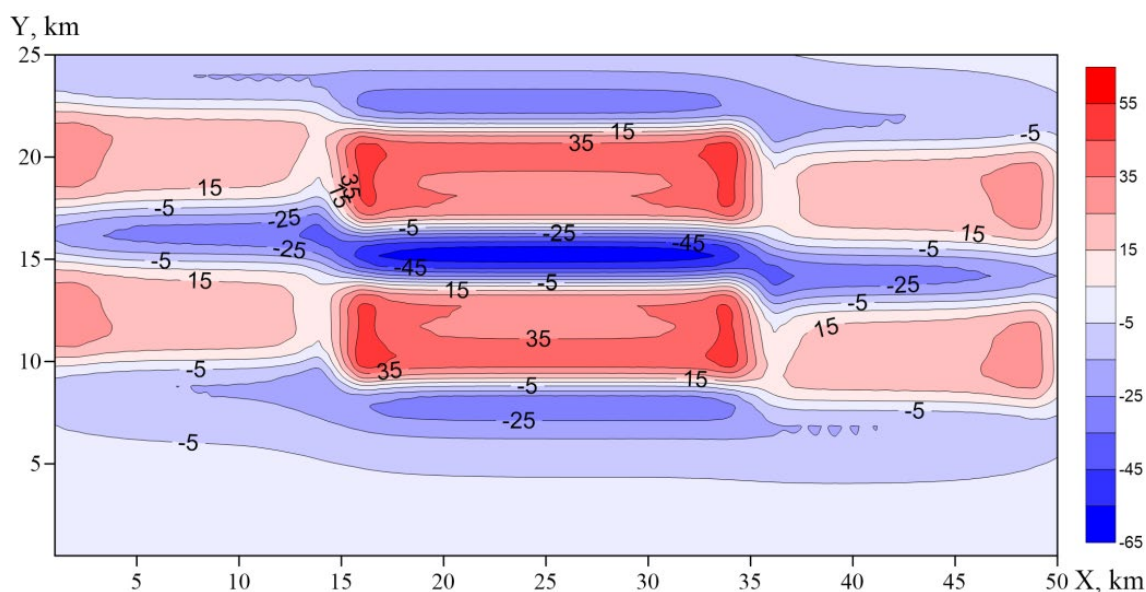


Рис. 4. Модель №1. Карта третьей вертикальной производной W_{zzz} /
Fig. 4. Model №1 Map of the third vertical derivative W_{zzz}

данных для изучения разломной тектоники и прогнозирования нефтегазоперспективных ловушек в глубокопогруженных горизонтах Предкавказья.

Для оценки эффективности гравиметрических методов при изучении систем разломов и зон трещиноватости была разработана серия моделей и рассчитаны аномальное гравитационное поле и его производные. Моделирование аномального гравитационного является довольно широко распространено в теории и практике гравirazведки [Приезжаев, 2010; Mueller et al., 2014; Schmidt et al., 2014]. Моделирование поля силы тяжести для геотермальных месторождений рассмотрено в ряде работ [McDonald et al., 2014; Abiyudo et al., 2003]. Для решения прямой задачи гравirazведки для вертикальных линейных призм различной ориентировки

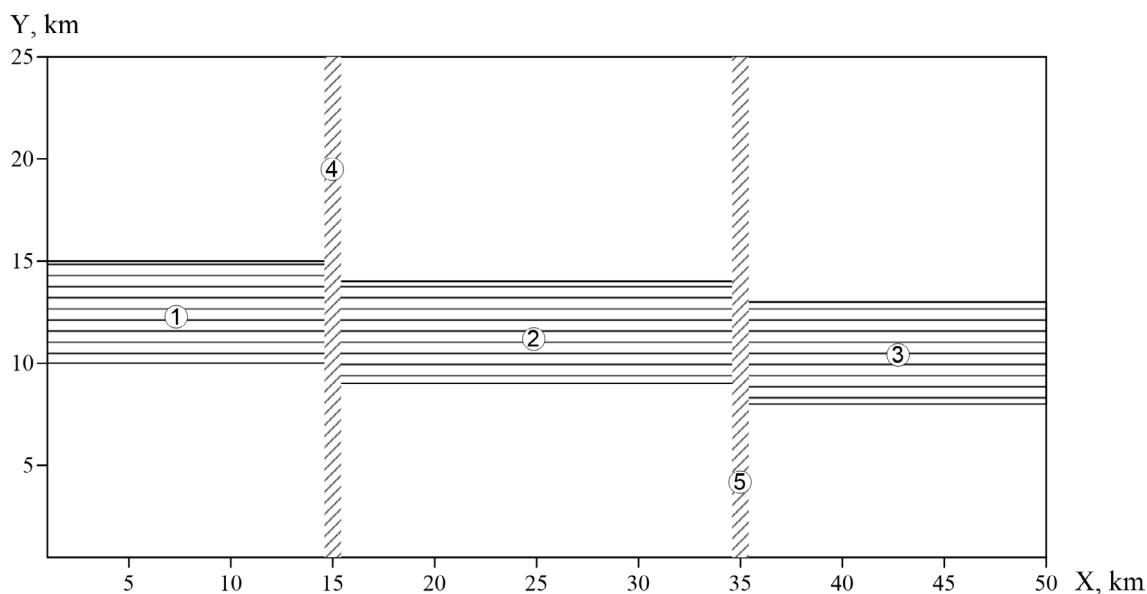


Рис. 5. Модель № 2. Схема расположения вертикальных призм и зон трещиноватости /

Fig. 5. Model № 2. Layout plan of vertical prisms and fracture zones

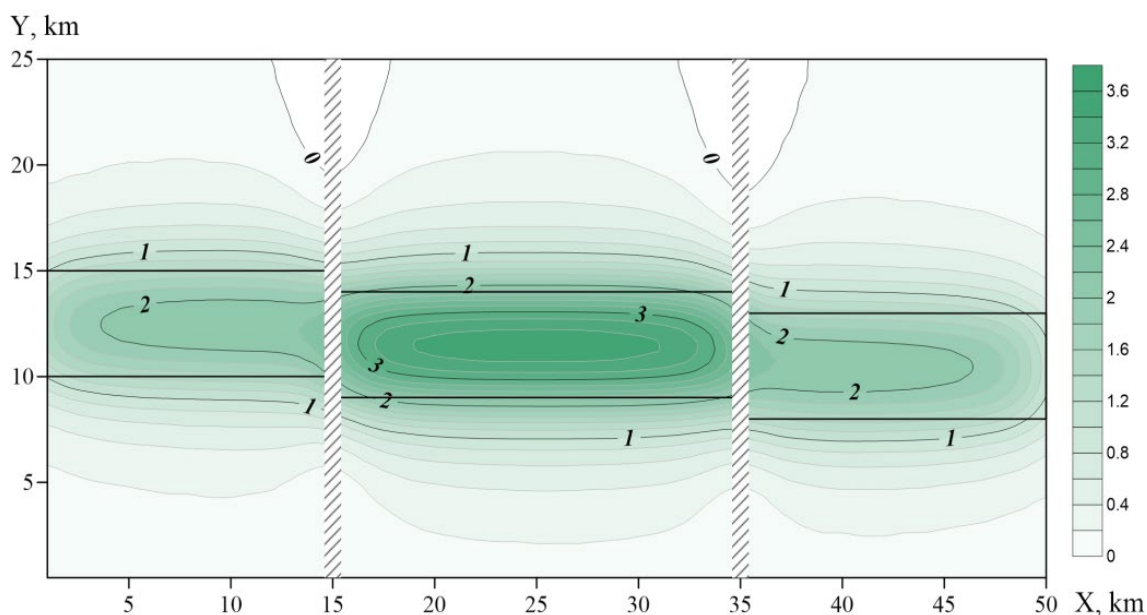


Рис. 6. Модель № 2. Карта поля силы тяжести Δg /

Fig. 6. Model № 2. Map of the anomalous gravity field Δg

была разработана программа, основанная на идеях решения прямых задач гравиметрии и магнитометрии для элементов полей от типовых аппроксимирующих тел В. Н. Страхова [Страхов и др., 1986а, б].

На рисунке 1 приведена схема расположения блоков, представляющих в плане два ряда по 3 призматических тела субширотной ориентировки, смещенных относительно друг друга на 1 км. Призмы 1, 3, 4 и 5 имеют одинаковые размеры 5x15 км, глубина залегания верхней грани составляет 2 км, нижней – 5 км. Призмы 2 и 5 имеют размеры 5x20 км, глубина залегания верхней грани составляет 1,5 км, нижней – 5 км.

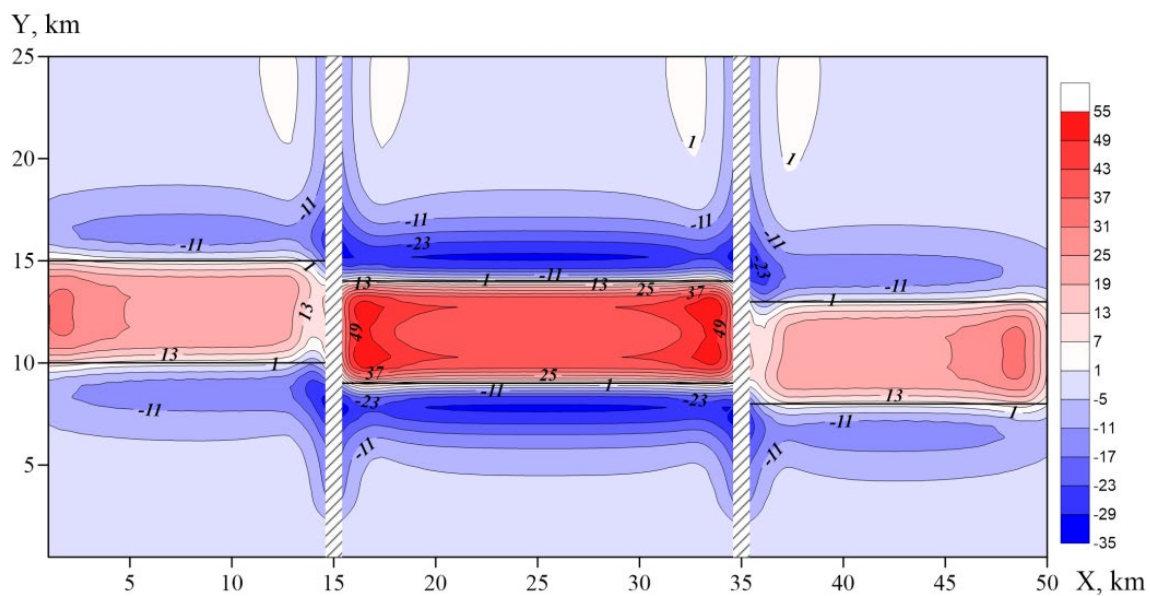


Рис. 7. Модель 2. Карта третьей вертикальной производной W_{zzz} /

Fig. 7. Model № 2. Map of the third vertical derivative W_{zzz}

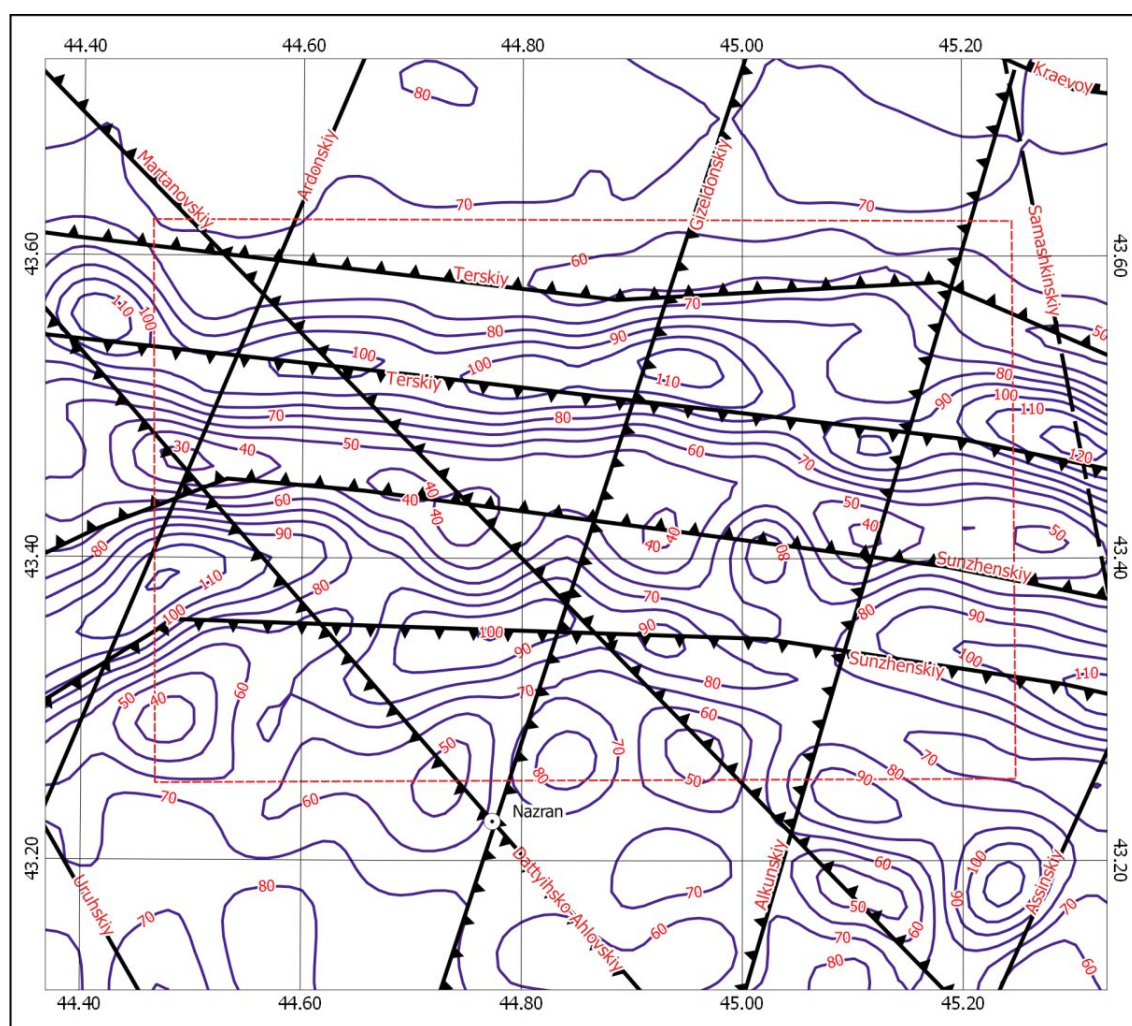


Рис. 8. Карта W_{zzz} и систем разломов западной части Терско-Сунженской антиклинальной зоны /

Fig. 3. Map of W_{zzz} and fault systems of the western part Terek-Sunzha anticline zone

Аномальное поле силы тяжести Δg для данной модели, полученное в результате решения прямой задачи приведено на рисунке 2. На данной карте видно, что аномальное поле вырисовывается в виде сложной аномалии, форма которой не позволяет однозначно выделить границы блоков.

На карте векторов горизонтального градиента силы тяжести (рис. 3) относительно неплохо выделяются субширотные границы, в то же время меридиональные границы выделить однозначно сложно.

На карте третьей вертикальной производной W_{zzz} (рис. 4) границы блоков вырисовываются достаточно четко, хорошо также видно смещение блоков.

На рисунке 5 приведена схема расположения блоков для модели № 2, представляющая в плане один ряд из 3 призматических тел субширотной ориентировки, смещенных относительно друг друга на 1 км, осложненных двумя меридиональными линейными зонами повышенной трещиноватости.

Карта аномального поля силы тяжести Δg для модели № 2 приведена на рисунке 6. На данной карте видно, что аномальное поле вырисовывается в виде сложной аномалии, форма которой не позволяет однозначно выделить границы блоков, зоны трещиноватости также выражены слабо.

На карте третьей вертикальной производной W_{zzz} (рис. 7), построенной для данной модели, достаточно выделяются блоки в виде квазипрямоугольных аномалий. Зоны трещиноватости выделяются в виде линейных отрицательных аномалий.

На рисунке 8 представлена карта W_{zzz} и систем разломов западной части Терско-Сунженской антиклинальной зоны. При выделении разломов следующие признаки на картах аномального гравитационного поля использовались:

- большие градиенты аномального гравитационного поля;
- полосы интенсивных положительных гравитационных аномалий или цепочки максимумов силы тяжести;
- резкая смена простиранья аномалий гравитационного поля;
- резкая смена знаков аномального гравитационного поля;
- смена общего характера гравитационного поля (сложно дифференцированное, слабовозмущенное, почти безаномальное);
- смена линейной формы слабо выраженных аномалий на изометрическую.

На морфометрических картах:

- линейные зоны повышенных уклонов рельефа земной поверхности;
- линейные зоны резкого изменения крутизны рельефа.

На рисунке 9 показано сопоставление схемы разломов, эпицентров землетрясений и рельефа описываемого района Терско-Сунженской антиклинальной зоны.

Выводы

1. Разработаны алгоритм и компьютерная программа вычисления элементов аномального гравитационного поля для системы разломов различной ориентировки, основанные на формулах В. Н. Страхова.

2. Программа протестирована на серии модельных примеров. Установлено, что разломно-блоковая тектоника и зоны повышенной трещиноватости наиболее четко отображаются в поле третьей вертикальной производной W_{zzz} .

3. Метод F-аппроксимации является высокоэффективным методом вычисления высших производных для исходных данных, заданных на нерегулярной в плане и по высоте поля силы тяжести.

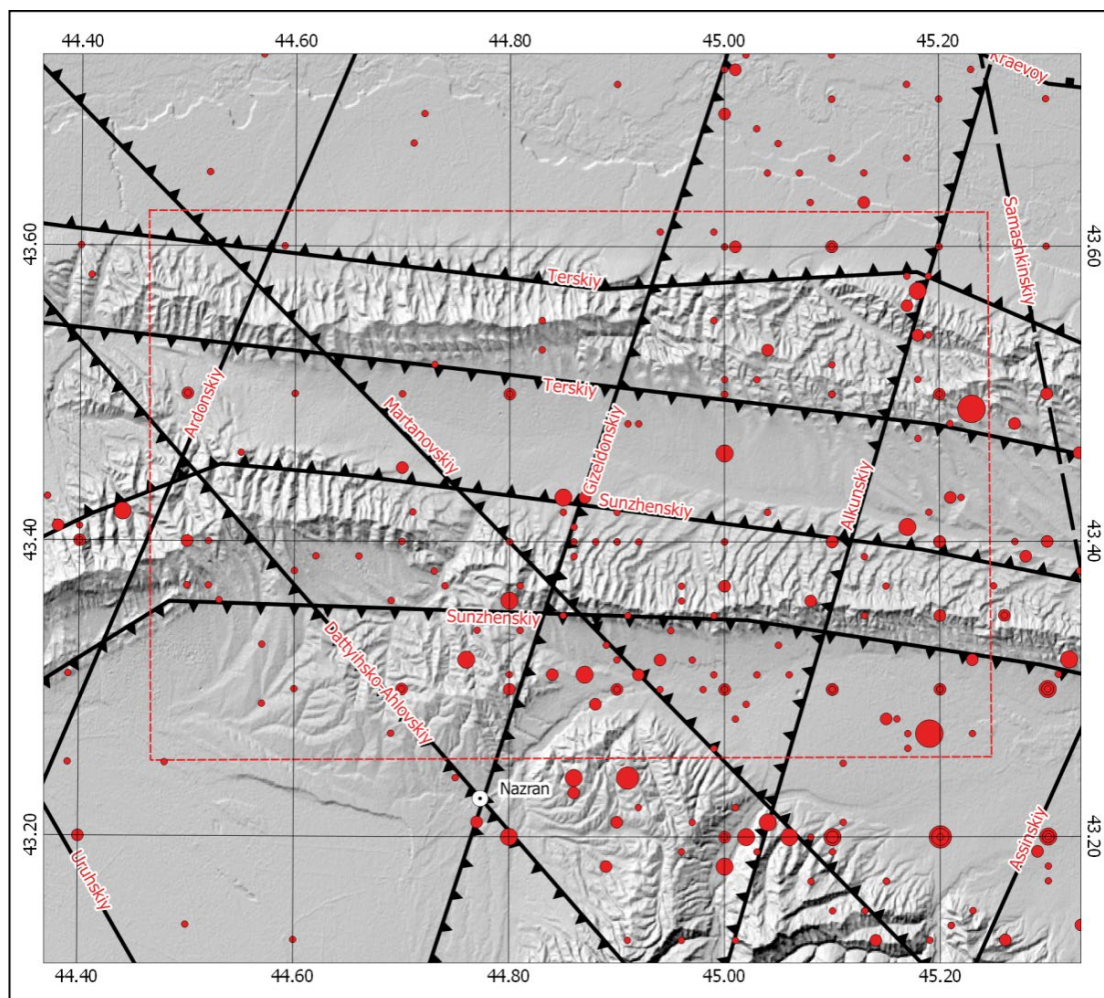


Рис. 9. Карта систем разломов и рельефа западной части Терско-Сунженской антиклинальной зоны /

Fig. 9. Map of fault systems and relief of the western part Terek-Sunzha anticline zone

4. На основе интерпретации поля третьей вертикальной производной W_{zzz} и морфометрического анализа рельефа земной поверхности уточнено расположение разломов для западной части Терско-Сунженской антиклинальной зоны.

5. Эпицентры сильных землетрясений, как правило, отмечаются в узлах пересечения разломов, эпицентры же слабых землетрясений отмечаются внутри блоков.

Литература

1. Босиков И. И., Ключев Р. В., Гаврина О. А. Анализ геолого-геофизических материалов и качественная оценка перспектив нефтегазоносности Южно-Харьбинского участка (Северный Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11 (1). – С. 6-21. DOI: 10.46698/VNC.2021.36.47.001
2. Давыденко Д. Б., Парада С. Г. Опыт разделения потенциальных полей Донбасса на фоновую, остаточную и локальную составляющие и некоторые результаты интерпретации. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11 (1). – С. 22-37. DOI: 10.46698/VNC.2021.23.67.003
3. Долгаль А. С. Компьютерные технологии обработки и интерпретации данных гравиметрических и магнитных съемок в горной местности. – Абакан: ООО «Фирма «Март», 2002. – 188 с.

4. Керимов И. А. Использование F-аппроксимации при интерпретации гравиметрических данных. I. Методика и результаты опробования на модельных примерах. // Физика Земли. – 2003. – № 1. – С. 57-76.
5. Керимов И. А. Использование F-аппроксимации при интерпретации гравиметрических данных. II. Результаты опробования на материалах гравиметрических и магнитометрических съемок. // Физика Земли. – 2009а. – № 5. – С. 77-93.
6. Керимов И. А. F-аппроксимации рельефа земной поверхности. // Физика Земли. – 2009б. – № 8. – С. 101-112.
7. Летавин А. И., Орел В. Е., Чернышев С. М. и др. Тектоника и нефтегазоносность Северного Кавказа. – М.: Наука, 1987. – 95 с.
8. Петров А. В., Трусов А. Н. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа трёхмерной геоинформации КОСКАД 3D. // Геофизика. – 2000. – № 4. – С. 29-33.
9. Приезжаев И. И. Уточнение геологической модели по данным гравитационного поля на основе критериальных методов решения обратных задач. // Геофизика. – 2010. – № 1. – С. 65-68.
10. Страхов В. Н., Керимов И. А. Аппроксимационные конструкции спектрального анализа (F-аппроксимация) гравиметрических данных. // Физика Земли. – 2001. – № 12. – С. 3-20.
11. Страхов В. Н., Лапина М. И., Ефимов А. Б. Решение прямых задач гравиметрии и магнитометрии на основе новых аналитических представлений для элементов полей от типовых аппроксимирующих тел. Ч. I. // Физика Земли. – 1986а. – № 6. – С. 55-69.
12. Страхов В. Н., Лапина М. И., Ефимов А. Б. Решение прямых задач гравиметрии и магнитометрии на основе новых аналитических представлений для элементов полей от типовых аппроксимирующих тел. Ч. II. // Физика Земли. – 1986б. – № 7. – С. 66-78.
13. Хузин Р. Р. Геотехнологические основы освоения трудноизвлекаемых запасов мелких сложнопостроенных месторождений нефти. – Самара: Нефть. Газ. Новации, 2012. – 384 с.
14. Abiyudo R., Daud Y., Drestanta Y. S. Subsurface Structure Identification from Gravity Modelling of Silangkitang Geothermal Field for Future Injection Well Targeting. // Proceedings. The 2nd Digital Indonesia International Geothermal Convention (DIIGC). – 2021.
15. McDonald, M. R., Gosnold, W. D. Gravity Modeling of the Rye Patch Known Geothermal Resource Area, Rye Patch, Nevada. // GRC Transactions. – 2014. – Vol. 38. – pp. 533-539.
16. Elkins T. A. The Second Derivative Method of Gravity Interpretation. // Geophysics. – 1951. – Vol. 16 (1). – pp. 29-50.
17. Mueller C. O., Wächter J., Jahnke C., Emilio L., Morer P., Riefstahl F., Malz A. Integrated geological and gravity modelling to improve 3-D model harmonization – Methods and benefits for the Saxony-Anhalt/Brandenburg cross-border region (North German Basin). // Geophysical Journal International. – 2021. – Vol. 227. Is. 2. – pp. 1295-1321.
18. Hinze W. J., Frese R. R. B. von Saad A. H. Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications. // Cambridge Univ. Press. – 2013.
19. Pasteka R., Richter F. P., Karcol R., Brazda K., Hajach M. Regularized derivatives of potential fields and their role in semi-automated interpretation methods. // Geophys. Prospect. – 2009. – Vol. 57 (4). – pp. 507-516.
20. Rogozhin E. A., Gorbaticov A. V., Zaalishvili V. B., Stepanova M. Y., Andreeva N. V., Kharazova Y. V. New data on the deep structure, tectonics, and geodynamics of the Greater Caucasus. // Doklady Earth Sciences. – 2015. – No. 462 (1). – pp. 543-545. DOI: 10.1134/S1028334X15050244
21. Schmidt S., Anikiev D., Götze H.-J., Gómez-García À., Gomez Dacal M. L., Meessen C., Plonka C., Rodriguez Piceda C., Spooner C., Scheck-Wenderoth M. IGMAS+ – a tool for interdisciplinary 3D potential field modelling of complex geological structures. // EGU General Assembly, EGU 2020-8383. – 2020.

22. Jacoby W., Smilde P.L. Gravity Interpretation. // Springer. – 2009. – 411 p.
23. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B. V., Morozov F.S., Tuaev G.E. Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center. // International Journal of GEOMATE. – 2018. – Vol. 15 (47). – pp. 158-163. DOI: 10.21660/2018.47.20218
24. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A. S., Dzeranov B. V., Shepelev V. D. Application of microseismic and calculational techniques in engineering-geological zonation. // International Journal of GEOMATE. – 2016. – Vol. 10 (1). – pp. 1670-1674.

References

1. Bosikov I.I., Klyuev R. V., Gavrina O.A. Analysis of geological-geophysical materials and qualitative assessment of the oil and gas perspectives of the Yuzhno-Kharbizhinsky area (Northern Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11 (1). pp. 6-21. (in Russ.) DOI:10.46698/VNC.2021.36.47.001.
2. Davydenko D.B., Parada S.G. Experience of Dividing Potential Fields of Donbass into Background, Residual and Local Components and some Results of Interpretation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11 (1). pp. 22-37. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.23.67.003.
3. Dolgal A.S. Computer technologies for processing and interpreting data of gravimetric and magnetic surveys in mountainous areas. Abakan, LLC Firma Mart. 2002. 188 p. (in Russ.)
4. Kerimov I.A. Application of the F-approximation to the gravity data interpretation. I. method and model tests. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2003. Vol. 39. No. 1. pp. 52-70. (англ. Версия)
5. Kerimov I.A. Application of the F-approximation to gravity data interpretation. II. the results of testing with the use of detailed gravity and magnetic surveys. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2009a. Vol. 45. No. 5. pp. 444-460. (англ. Версия)
6. Kerimov I.A. F-approximation of the Earth's surface topography. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2009b. Vol. 45. No. 8. pp. 719-729. (англ. Версия)
7. Letavin A.I., Orel V.E., Chernyshev S.M. et al. Tectonics and oil and gas potential of the North Caucasus. Moscow. Nauka. 1987. 95 p. (in Russ.)
8. Petrov A.V., Trusov A.N. Computer technology for statistical and spectral-correlation analysis of three-dimensional geoinformation KOSKAD 3D. *Geophysics*. 2000. No. 4. pp. 29-33. (in Russ.)
9. Priezzhaev I. I. Refinement of the geological model according to the data of the gravitational field based on criterial methods for solving inverse problems. *Geophysics*. 2010. No. 1. pp. 65-68. (in Russ.)
10. Strakhov V.N., Kerimov I.A. Approximating constructions in the spectral analysis gravity data: F-approximation. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2001. Vol. 37. No. 12. pp. 969-986. (англ. Версия)
11. Strakhov V.N., Lapina M.I., Efimov A.B. Solution of direct problems of gravimetry and magnetometry based on new analytical concepts for field elements from typical approximating bodies. Part I. *Physics of the Earth*. 1986a. No. 6. pp. 55-69. (in Russ.)
12. Strakhov V.N., Lapina M.I., Efimov A.B. Solution of direct problems of gravimetry and magnetometry based on new analytical concepts for field elements from typical approximating bodies. Part II. *Physics of the Earth*. 1986b. No. 7. pp. 66-78. (in Russ.)
13. Khuzin R.R. Geotechnological foundations for the development of hard-to-recover reserves of small complex oil fields. Samara, Oil. Gas. Innovations. 2012. 384 p. (in Russ.)
14. Abiyudo R., Daud Y., Drestanta Y.S. Subsurface Structure Identification from Gravity Modelling of Silangkitang Geothermal Field for Future Injection Well Targeting. In: *Proceedings. The 2nd Digital Indonesia International Geothermal Convention (DIIGC)*. 2021.

15. McDonald, M. R., Gosnold, W. D. Gravity Modeling of the Rye Patch Known Geothermal Resource Area, Rye Patch, Nevada. GRC Transactions. 2014. Vol. 38. pp. 533-539.
16. Elkins T.A. The Second Derivative Method of Gravity Interpretation. Geophysics. 1951. Vol. 16. pp. 29-50.
17. Mueller C. O., Wächter J., Jahnke C., Emilio L., Morer P., Riefstahl F., Malz A. Integrated geological and gravity modelling to improve 3-D model harmonization – Methods and benefits for the Saxony-Anhalt/Brandenburg cross-border region (North German Basin). Geophysical Journal International. 2021. Vol. 227. Issue 2. pp. 1295-1321.
18. Hinze W.J., Frese R. R. B. von Saad A. H. Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications. Cambridge Univ. Press. 2013.
19. Pasteka R., Richter F.P., Karcol R., Brazda K., Hajach M. Regularized derivatives of potential fields and their role in semi-automated interpretation methods. Geophys. Prospect. – 2009. – Vol. 57. pp. 507-516.
20. Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Zaalishvili V.B., Stepanova M.Y., Andreeva N.V., Kharazova Y. V. New data on the deep structure, tectonics, and geodynamics of the Greater Caucasus. Doklady Earth Sciences. 2015. No. 462 (1). pp. 543-545. DOI: 10.1134/S1028334X15050244
21. Schmidt S., Anikiev D., Götze H.-J., Gómez-García À., Gomez Dacal M. L., Meessen C., Plonka C., Rodriguez Piceda C., Spooner C., Scheck-Wenderoth M. IGMAS+ – a tool for interdisciplinary 3D potential field modelling of complex geological structures. EGU General Assembly, EGU 2020-8383. 2020.
22. Jacoby W., Smilde P. L. Gravity Interpretation. Springer. 2009. 411 p.
23. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B. V., Morozov F. S., Tuaev G. E. Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center. International Journal of GEOMATE. 2018. Vol. 15 (47). pp. 158-163. DOI: 10.21660/2018.47.20218
24. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A. S., Dzeranov B. V., Shepelev V. D. Application of microseismic and calculational techniques in engineering-geological zonation. International Journal of GEOMATE. 2016. Vol. 10 (1). pp. 1670-1674.

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.394

DOI: [10.46698/VNC.2022.75.68.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.75.68.006)

Оригинальная статья

Влияние нелинейных свойств среды на сейсмический эффект сильных землетрясений

Д. А. Мельков^{id}, А. Ф. Габараев^{id}, М. И. Фидарова^{id},
Т. И. Мерзликин^{id}, З. В. Персаева^{id}

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

Статья поступила: 02.11.2022, доработана: 05.12.2022, одобрена в печать: 13.12.2022

Резюме: Актуальность работы. Традиционно сейсмические воздействия в практике сейсмостойкого строительства оцениваются величиной пикового горизонтального ускорения грунта. При анализе последствий сильных и разрушительных землетрясений необходимо учитывать многофакторность влияния процесса землетрясения на застройку. Известно, что нелинейные свойства среды оказывают влияние на спектральный состав и амплитуду колебаний на поверхности толщи, что обуславливает зависимость сейсмического эффекта от уровня воздействия. **Целью** работы является установление связи инструментальной сейсмической интенсивности с нелинейными свойствами среды в сложных инженерно-геологических и геоморфологических условиях. **Методы работы.** Моделирование колебаний грунтовой толщи выполнялось методом конечных элементов. Основные механические свойства среды были дополнены параметром, характеризующим нелинейную зависимость «напряжение-деформация». **Результаты работы.** Выполнено моделирование сейсмических колебаний грунтовой толщи с различным значением параметра крутизны нелинейной зависимости «напряжение-деформация». В результате установлены различия в спектральном составе и пространственном распределении энергии колебаний. В нелинейных спектрах происходит перераспределение энергии в более высокочастотную область, кратную основному пику, тем сильнее, чем сильнее крутизна кривой «напряжение-деформация». Установлено, что в целом различные инструментальные меры интенсивности имеют одинаковый характер изменения вдоль профиля, исключение составляет кумулятивная абсолютная скорость, распределение которой сильно меняется для разных значений крутизны кривой «напряжение-деформация». Степень проявления нелинейных свойств грунтов также может характеризоваться величиной площади нормированного спектра, увеличение которой связано с увеличением ширины спектра, обусловленной перераспределением энергии в более высокочастотную область.

Ключевые слова: макросейсмическая интенсивность, параметры движения грунта, спектральный состав, инструментальная сейсмическая интенсивность

Благодарности: Авторы выражают благодарность научному руководителю д. ф.-м. н., профессору В. Б. Заалишвили.

Для цитирования: Мельков Д. А., Габараев А. Ф., Фидарова М. И., Мерзликин Т. И., Персаева З. В. Влияние нелинейных свойств среды на сейсмический эффект сильных землетрясений. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (4): 72-84. DOI: [10.46698/VNC.2022.75.68.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.75.68.006).

GEOPHYSICS

[DOI: 10.46698/VNC.2022.75.68.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.75.68.006)

Original paper

Influence of nonlinear properties of the medium on the seismic effect of strong earthquakes

D. A. Melkov^{id}, A. F. Gabaraev^{id}, M. I. Fidarova^{id},
T. I. Merzlikin^{id}, Z. V. Persaeva^{id}

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

Received: 02.11.2022, revised: 05.12.2022, accepted: 13.12.2022

Abstract. Relevance. Traditionally, seismic impacts in the practice of earthquake-resistant construction are estimated by peak horizontal ground acceleration. Consequences of strong and destructive earthquakes show multifactorial impact of the earthquake process on buildings. It is known that the nonlinear properties of the medium affect the spectral contents and the amplitude of vibrations on the surface of the stratum, which causes the dependence of the seismic effect on the level of impact. **The aim** of the work is to establish a relationship between instrumental seismic intensity and nonlinear properties of the medium in complex engineering-geological and geomorphological conditions. **Methods.** Modeling of oscillations of the soil stratum was carried out by the finite element method. The main mechanical properties of the medium were supplemented by a parameter characterizing the nonlinear stress-strain relationship. **Results.** The simulation of the propagation of seismic waves in a medium with a different degree of nonlinear properties, specified by the steepness of nonlinear stress-strain curve, is performed. As a result, differences in the spectral composition and spatial distribution of vibration energy were established. In nonlinear spectra, the energy is redistributed to a higher frequency region, a multiple of the main peak, the stronger, the steeper the stress-strain curve. It has been established that, in general, various instrumental intensity measures have the same pattern of change along the profile, with the exception of the cumulative absolute velocity, the distribution of which varies greatly for different steepness values of the stress-strain curve. The degree of manifestation of the nonlinear properties of soils can also be characterized by the area of the normalized spectrum, the increase in which is associated with an increase in the width of the spectrum due to the redistribution of energy to a higher frequency region.

Keywords: macroseismic intensity, ground motion parameters, spectral composition, instrumental seismic intensity.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the scientific adviser Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor V. B. Zaalishvili.

For citation: Melkov D. A., Gabaraev A. F., Fidarova M. I., Merzlikin T. I., Persaeva Z. V. Influence of nonlinear properties of the medium on the seismic effect of strong earthquakes. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (4): 72-84. DOI: 10.46698/VNC.2022.75.68.006.

Введение

О проявлении нелинейных свойств в грунтах известно уже достаточно давно. По инструментальным данным [Гвоздев, Кузнецов, 1977; Николаев, 1987; Заалишвили, 1983; Заалишвили и др., 2021, 2022а; Zaalishvili, 2016] и данным математического моделирования [Полтавцев и др., 1998; Bonnet, Heitz, 1995] известно, что при интенсивных сейсмических нагрузках происходит перераспределение энергии колебаний, образование сейсмических волн с частотой равной сумме и разности частот взаимодействующих волн, волн с частотами кратными частоте возмущающей силы. Это определяет возможность возникновения резонансов на частотах, кото-

рые невозможно прогнозировать в рамках линейных моделей и инструментальных методов, основанных на слабых воздействиях (регистрация микросейсм и слабых землетрясений).

Первой работой, которая была посвящена вопросам непосредственной оценки нелинейности в грунтах является теоретическая работа А. В. Николаева [1967]. Позже А. А. Гвоздев и В. В. Кузнецов исследовали нелинейные явления в эпицентре небольшого взрыва [Гвоздев, Кузнецов, 1977]. Как показывают соответствующие исследования, в формировании сейсмических волновых полей в реальных средах определенную роль играет физическая нелинейность, характеризующаяся нелинейностью связи напряжения и деформации [Заалишвили, 2009]. При трансформации линейно-упругих деформаций в нелинейно-упругие энергия «перекачивается» в ВЧ диапазон спектра, оставаясь постоянной, и площадь реального спектра колебаний не меняется. Проявление нелинейных свойств грунтов в высокочастотной области спектра инструментально было установлено В. Б. Заалишвили в 1987 г. в г. Гори [Заалишвили, 1987].

В методическом плане экспериментальные исследования необходимо проводить на участках с известной проявленной интенсивностью землетрясения, что предполагает сопоставление параметров нелинейности соответствующих грунтов. С другой стороны, из существующих приемов оценки нелинейности необходимо выбрать наиболее оптимальные, дающие возможность получения указанных параметров в виде, который мог быть непосредственно использован в последующем при решении практических задач сейсмического микрорайонирования. С помощью математического моделирования могут быть рассмотрены различные типы кривых «напряжение-деформация», что позволит вычислить различные параметры нелинейности, согласовать их с экспериментальными данными и получить соответствующие оценки в условиях естественного залегания.

Моделирование сейсмических колебаний геологических объектов методом конечных элементов

Моделирование методом конечных элементов позволяет строить двухмерные и трехмерные модели и подходит для моделирования геологических объектов [Заалишвили и др., 2001, 2008].

Основная идея МКЭ заключается в том, что исследуемый объект представляется в виде совокупности отдельных элементов конечных размеров, связанных между собой в узлах. В качестве элементов используются тела различных конфигураций: призмы – в трехмерных задачах; стержни – в разных конструкциях; треугольники, четырехугольники и другие плоские фигуры – в двумерных задачах [Бате, Вилсон, 1982]. Выбор треугольных элементов имеет ряд преимуществ, т.к. сетка из треугольных элементов позволяет достаточно точно описать любую форму рельефа и слоистой структуры грунтового массива со своими физико-механическими свойствами, изменяющимися во времени в зависимости от интенсивности воздействия. В качестве воздействия используется акселерограмма землетрясения, как правило горизонтального направления, приложенная к основанию грунтового массива. Грунт находится в условиях плоской деформации и рассматривается как ортотропная среда. Оси ортотропии совпадают с направлениями главных напряжений.

Моделирование нелинейных колебаний грунтового массива осуществляется путем последовательного определения напряженно-деформированного состояния

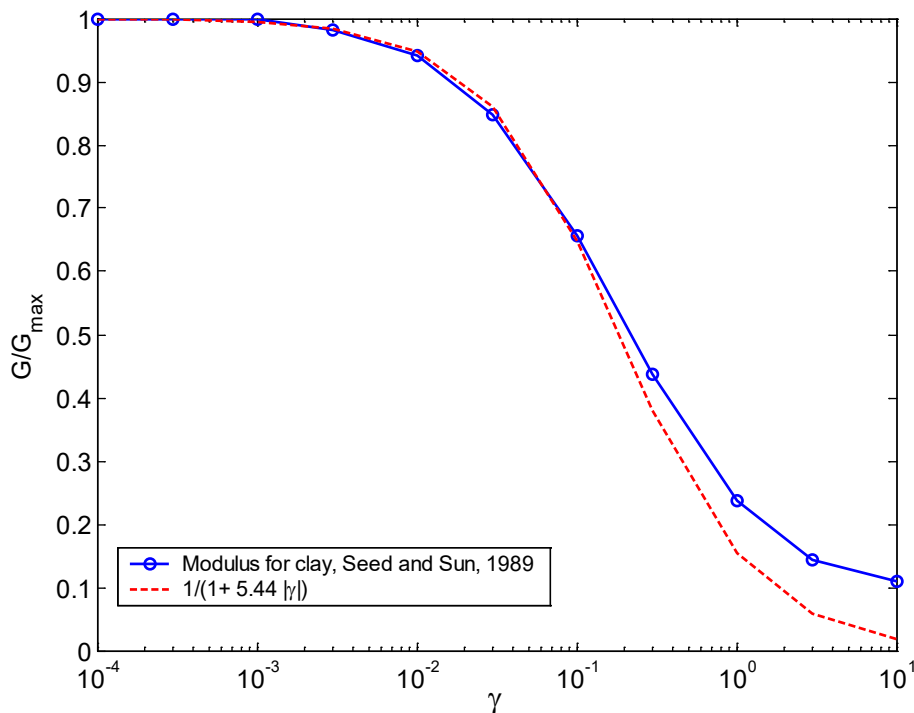


Рис. 1. Зависимость нормированного модуля упругости от деформации сдвига /

Fig. 1. Dependence of the normalized modulus of elasticity on shear strain

системы в каждый момент времени (дискретизации акселерограммы), учитывая состояние системы на предыдущем шаге. На каждом шаге система считается линейно-упругой.

Для описания нелинейных свойств грунтовой среды воспользуемся аналитической функцией, предложенной в работе [Bonnet, Heitz, 1995], связывающей деформации сдвига $\gamma(z, t)$ и касательные напряжения $\tau(z, t)$:

$$\tau = G(\gamma)\gamma, \quad G(\gamma) = \frac{G_0}{1 + \frac{|\gamma|}{\gamma_0}}, \quad \gamma_0 = \frac{\tau_{\max}}{G_0}, \quad (1)$$

где $\tau_{\max}$ – максимальное значение касательного напряжения; t – время.

Иначе:

$$G(\gamma) = \frac{G_0}{1 + \alpha|\gamma|}, \quad (2)$$

где $\alpha = \frac{1}{\gamma_0}$ – нелинейный параметр, соответствующий тому или иному типу грунта.

В расчетах использовалась зависимость G/G_0 для глинистых грунтов по данным работ [Hardin, Drnevich, 1972; Seed, Idriss, 1970; Seed et al., 1986; Seed, Sun, 1989; Ganapathy et al., 2020]. Соответствующая параметризованная кривая представлена на рисунке 1.

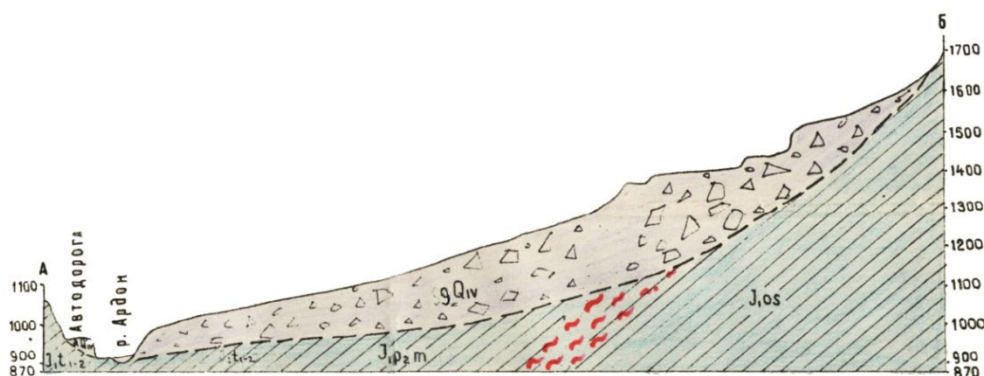


Рис. 2. Схематический продольный разрез Луарского оползня /
Fig. 2. Schematic longitudinal section of the Luar landslide

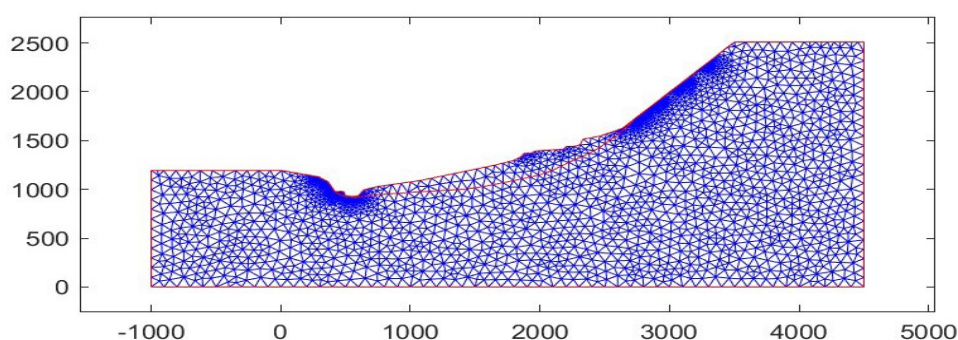


Рис. 3. Расчетная область, представленная с помощью конечных элементов /
Fig. 3. Computational region represented by finite elements

Результаты работы и их обсуждение

Практический интерес при использовании метода конечных элементов представляет исследование оползневых объектов и моделирование поведения грунтов при интенсивных сейсмических колебаниях. В качестве примера был рассмотрен Луарский оползень, расположенный на правом склоне долины р. Ардон, в 1,0 км западнее селения Унал (РСО-Алания, Алагирский район), и являющийся одним из наиболее крупных в Северной Осетии. В плане этот оползень имеет вытянутую форму и достигает в длину 2,3 км при средней ширине 650-700 м. Рыхлые отложения, слагающие тело оползня, состоят из светло-коричневого суглинка и серой супеси, включающих отдельные крупные глыбы, обломки и щебень коренных пород. Тело оползня подстилают аргиллиты, алевролиты, песчаники Мизурской свиты (J_{p2m}), падающие к реке Ардон под углами 40-45°. Видимая мощность рыхлых оползневых отложений 50-60 м. Схематический разрез Луарского оползня представлен на рисунке 2.

Представим исследуемую область в виде двух подобластей – основания из коренных пород, подстилающее тело оползня (подобласть 1), и тела оползня (подобласть 2). Произведем разбиение всей области на треугольные конечные элементы. Разбиение на треугольные элементы обусловлено простотой и гибкостью описания конструкций сколько угодно сложной формы (рис. 3).

Будем считать каждую подобласть однородной с параметрами, характерными для алевролитов и песчаников в подобласти 1, и суглинков в подобласти 2. Сейс-

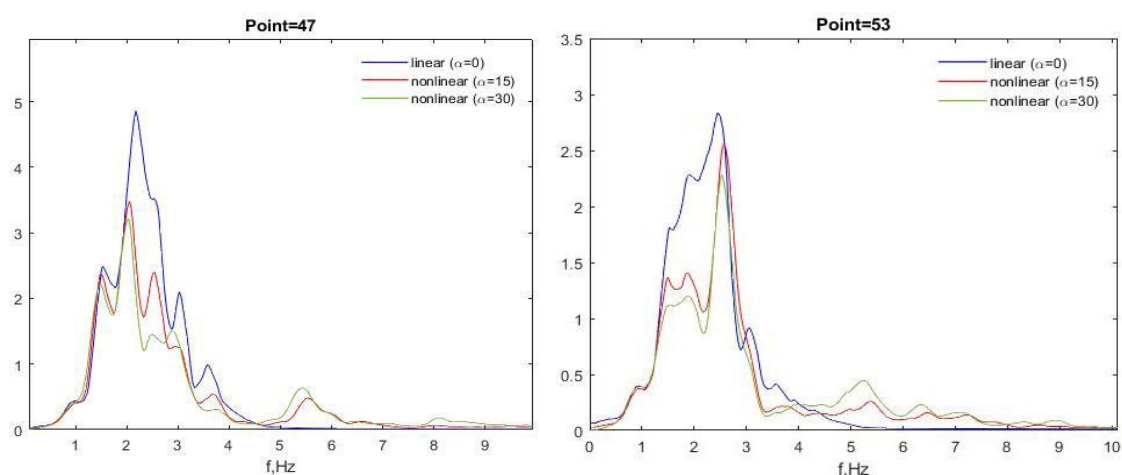


Рис. 4. Спектры колебаний на поверхности при различном значении параметра нелинейности /
Fig. 4. Vibrations spectra on the surface for different values of the nonlinearity parameter

мические свойства оползневое тело определялись по данным сейсморазведочных работ [Zaalishvili et al., 2020a].

Подобласть 1: плотность грунта $\rho = 2600 \text{ кг/м}^3$, скорость поперечных волн $v = 1200 \text{ м/с}$ и коэффициент Пуассона $\mu = 0,2$.

Подобласть 2: плотность грунта $\rho = 1900 \text{ кг/м}^3$, скорость поперечных волн $v = 700 \text{ м/с}$ и коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Будем считать, что основание рассматриваемой области (нулевой слой), а также левый и правый края – жестко закреплены, а прилагаемые силы воздействуют на первый слой. В качестве внешней нагрузки R будем использовать реальный сейсмический сигнал Лома-Приета продолжительностью 40 секунд при частоте дискретизации $dt=0,02 \text{ с}$.

Расчеты выполнялись для различных параметров нелинейности α : 0 (линейный расчет), 15, 30. Построим спектры сигнала в некоторых узлах, расположенных на поверхности рассматриваемой области – рисунок 4. В нелинейном случае проявляется составляющая на частоте 5,4-5,5 Гц. Представляет интерес рассмотреть пространственное распределение частоты колебаний вдоль оползневого тела (рис. 5-6).

В результате, перераспределение энергии колебаний происходит не только в частотном диапазоне, но и характеризуется определенными пространственными закономерностями. В частности, в нелинейном случае высокочастотная составляющая на частоте 6,5-8 Гц наблюдается на координате 2000 м, 5 Гц – в интервалах от 0 до 800 м и 2200-2300 м (рис. 6б, в). При этом составляющая на частоте 2,5 Гц пропорционально уменьшается по сравнению с линейным расчетом. Указанные интервалы приурочены к неоднородностям рельефа и, соответственно, увеличению амплитуд колебаний и, как следствие, большему проявлению нелинейных свойств. Пространственная неоднородность полей ускорений дневной поверхности также выделялась инструментально и ранее [Заалишвили и др., 2022б].

При интенсивных воздействиях в рыхлых грунтах наблюдается увеличение сейсмического эффекта. В то же время, при сильных воздействиях сейсмический эффект из-за нелинейности грунтов может иногда значительно уменьшаться. Это подтверждается как записями сильных землетрясений, так и экспериментальными данными (запись г. Гори). Поэтому нелинейные явления важны при определении инструментальной меры сейсмической интенсивности.

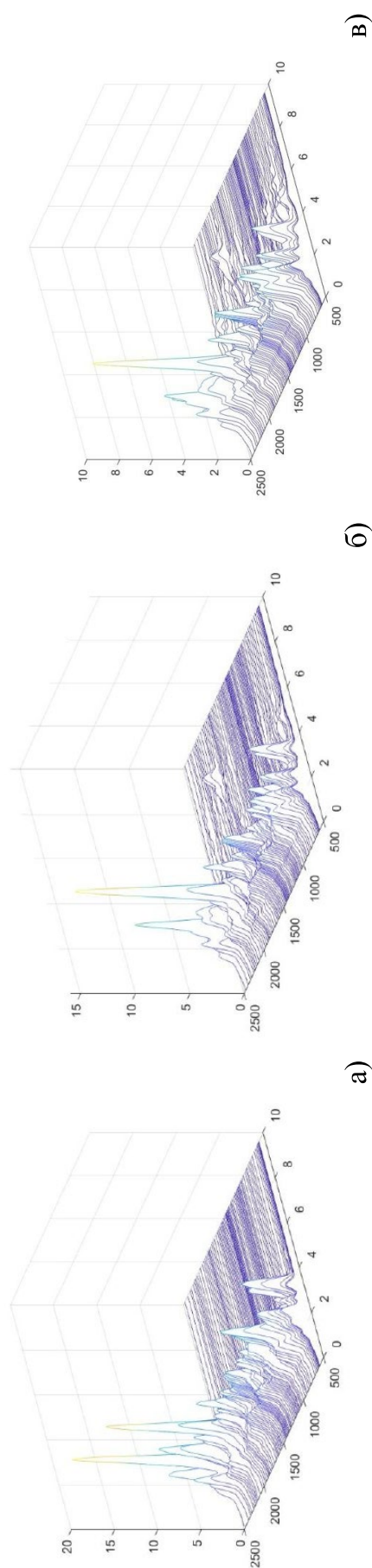


Рис. 5. Спектры колебаний вдоль оползневого тела при различных значениях параметра нелинейности: а) $\alpha = 0$; б) $\alpha = 15$; в) $\alpha = 30$ /
 Fig. 5. Vibrations spectra on the surface for different values of the nonlinearity parameter

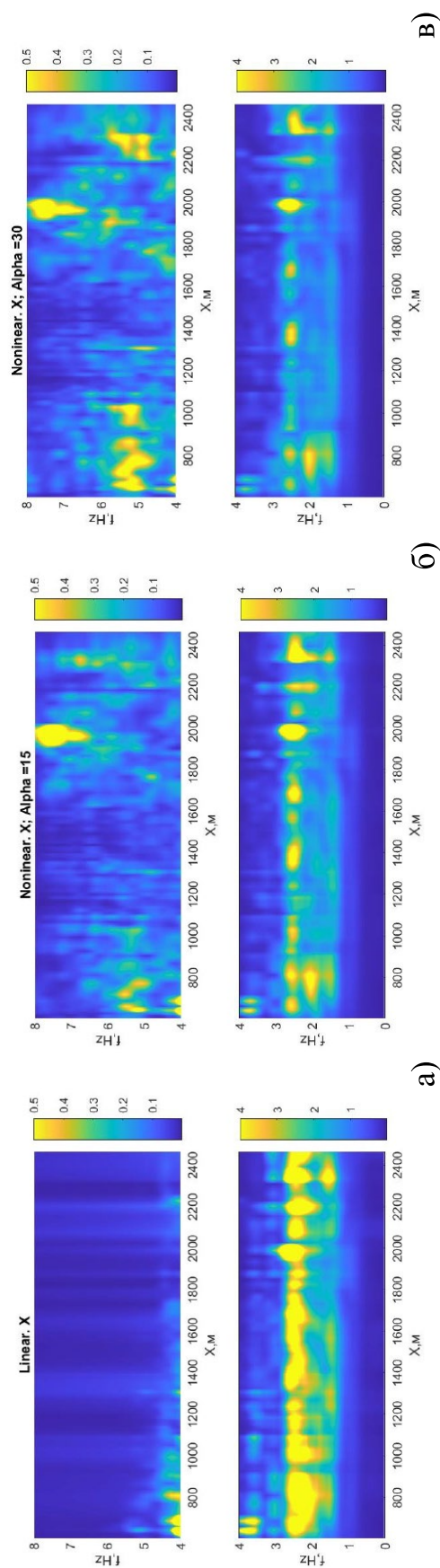


Рис. 6. Спектры колебаний вдоль оползневого тела при различных значениях параметра нелинейности: а) $\alpha = 0$; б) $\alpha = 15$; в) $\alpha = 30$ /
 Fig. 6. Vibrations spectra on the surface for different values of the nonlinearity parameter: а) $\alpha = 0$; б) $\alpha = 15$; в) $\alpha = 30$

Макросейсмическая интенсивность представляет собой локальную меру сотрясения грунта при землетрясении, соответствующую реакции различных объектов в виде повреждений различной степени зданий и сооружений. Оценка сейсмической интенсивности является мерой эффекта воздействия сейсмических колебаний, которые приводят впоследствии к разрушениям различных объектов, в первую очередь, зданий и сооружений, а также соответствующим ущербам. В связи с чем макросейсмическая интенсивность является параметром, напрямую оценивающим сейсмические риски (как статистические распределения степени и количества повреждений зданий различного типа) [Gutenberg; Richter, 1956; Trifunac, Brady, 1975; Wald et al., 1999; Musson et al., 2009; Caprio et al., 2015; Zaalishvili et al., 2020b].

Поскольку величина PGA является основополагающим в сейсмическом зонировании параметром движения грунта и сейсмическом проектировании зданий и сооружений, в первую очередь, именно связь между PGA и интенсивностью была проанализирована и установлена [Gutenberg; Richter, 1956; Trifunac, Brady, 1975]. Параметр PGV (пиковая скорость) более показателен для повреждений от землетрясения в более гибких конструкциях, и модели линейной регрессии генерируются на основе PGV. Wald et al. [1999] установили, что значения интенсивности, рассчитанные с помощью PGV, были надежнее, чем значения, основанные на PGA, если фактическая сейсмическая интенсивность была не ниже VII баллов. Akansel et al. [2014] заявили, что связь сейсмической шкалы MMI с PGA или PGV зависит от прочности грунтов. Bilal и Askan [2014] пришли к выводу, что MMI имеет лучшую линейную корреляцию с PGA для жесткой структуры и PGV – для пластичной структуры. С инженерной точки зрения PGV позволяет непосредственно учитывать воздействующую и поглощаемую исследуемым объектом энергии. Помимо PGA и PGV, для установления взаимосвязей также используются другие параметры движения грунта.

Основные параметры воздействия можно разделить на амплитудные: максимальные скорости (PHD), смещения (PHV и ускорения (PHA), среднеквадратическое ускорение (RMS), спектральные параметры – средневзвешенная частота (f_{aw}), энергетические параметры, такие как площадь спектра (S_r), 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 работе [Заалишвили и др., 2022б].

На рисунке 7 приведены различные меры сейсмической интенсивности вдоль профиля. Большинство параметров имеют схожий характер изменений. Исключение составляют пиковое значение скорости PGV, площадь реального спектра S_r и кумулятивная абсолютная скорость CAV. Значения пиковой скорости совпадают с аналогичными для ускорений и смещений, но увеличение параметра α приводит к увеличению PGV (рис. 7б). Поскольку проявление нелинейных свойств проявляется в увеличении ширины спектра, площадь нормированного спектра S_n увеличивается (рис. 7з). Качественные различия от нелинейного параметра α наиболее существенны для кумулятивной скорости CAV (рис. 7д).

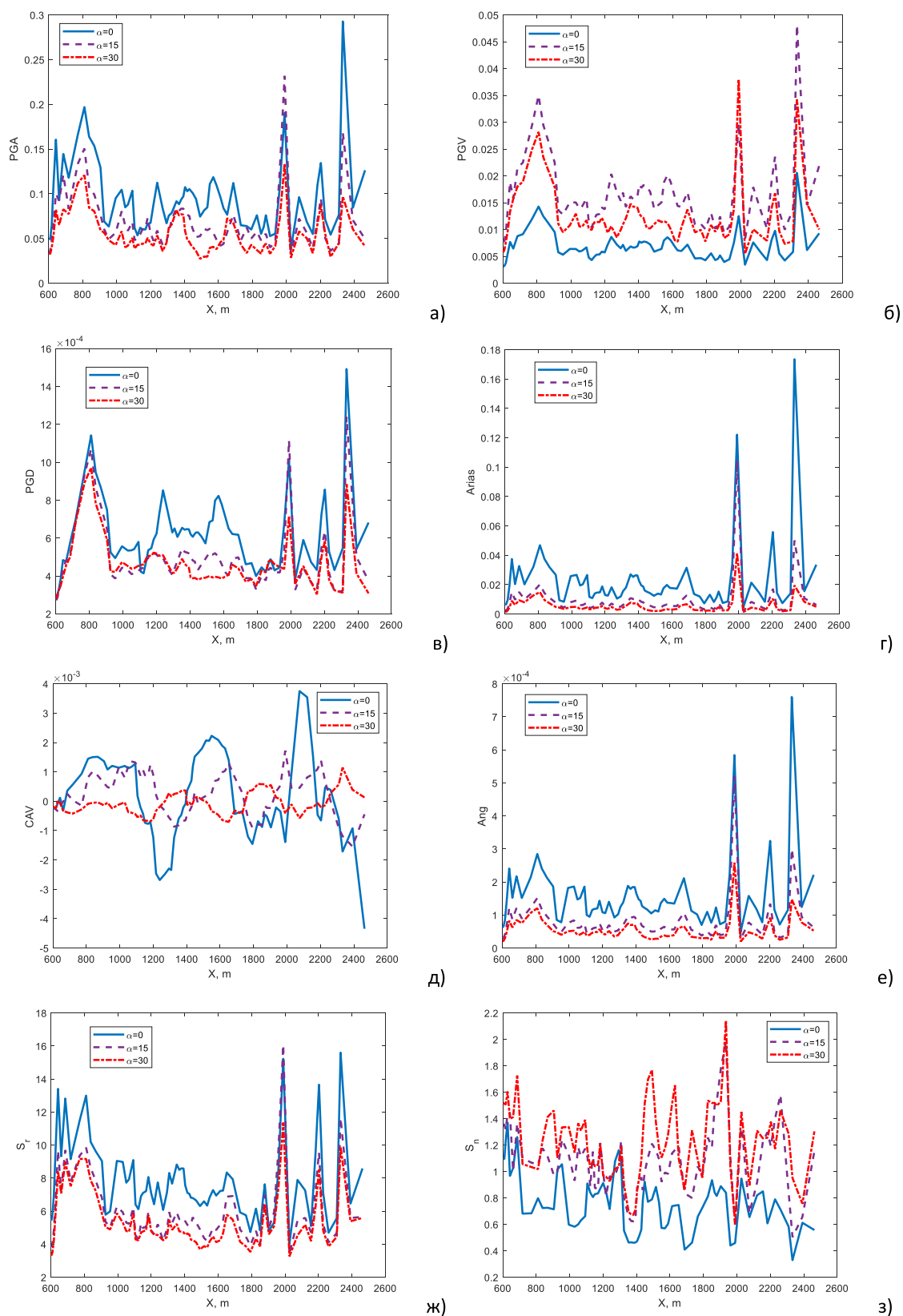


Рис. 7. Вариация инструментальной меры интенсивности вдоль профиля при различном значении крутизны кривой «напряжение-деформация» /

Fig. 7. Variation of the instrumental measure of intensity along the profile at different values of the steepness of the "stress-strain" curve

Выводы

1. Разработаны модели распространения сейсмических волн в среде с различной степенью проявления нелинейных свойств, задаваемых параметром крутизны нелинейной зависимости «напряжение-деформация».
2. Реализован алгоритм моделирования колебаний грунтовой толщи методом конечных элементов на основе экспериментальных зависимостей «напряжение-деформация».
3. Установлены различия в спектральном составе и пространственном распределении энергии колебаний. В нелинейном случае происходит перераспределение энергии в более высокочастотную область, кратную основному пику тем сильнее, чем больше параметр нелинейности (при равной амплитуде воздействия).
4. Проявление сейсмической интенсивности может значительно меняться под влиянием сложных инженерно-геологических и геоморфологических условий. Неоднородности рельефа приводят к увеличению амплитуд колебаний и, соответственно, к большему проявлению нелинейных эффектов – перераспределению энергии в высокочастотную область с одновременным уменьшением амплитуды колебаний.
5. Большинство параметров инструментальной сейсмической интенсивности имеет схожий характер изменений. Исключение составляют пиковое значение скорости PGV, площадь реального спектра S_r и кумулятивная абсолютная скорость SAV. Наибольшее влияние параметр нелинейности оказывает на кумулятивную абсолютную скорость SAV.
6. Степень проявления нелинейных свойств грунтов характеризуется величиной площади нормированного спектра, увеличение которой связано с увеличением ширины спектра, обусловленной перераспределением энергии в более высокочастотную область.

Литература

1. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов: Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
2. Гвоздев А. А., Кузнецов В. В. О явлении частичного откола. // Изв. АН СССР, Физика Земли. – 1977. – № 2. – С. 21-27.
3. Заалишвили В. Б. Применение мощного газодинамического источника для исследования колебаний грунтовой толщи. // Сообщения Академии наук Грузинской ССР. – 1983. – Т. 109. № 2. – С. 345.
4. Заалишвили В. Б. Опыт применения инструментального метода сейсмического микрорайонирования. // Сейсмическое микрорайонирование территорий городов и крупных строек. – Тбилиси: Мецниереба, 1987. – С. 65-85.
5. Заалишвили В. Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. – М.: Наука, 2009. – 350 с.
6. Заалишвили В. Б., Джавришвили И. А., Отинашвили М. Г. Расчет нелинейных колебаний грунтовой толщи с помощью численного способа МКЭ сейсмического микрорайонирования. // Теория сооружений и сейсмостойкость. № 1. – Тбилиси: ИСМИС им. К. С. Завриева, 2001. – С. 67-73.
7. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Отинашвили М. Г. Использование метода конечных элементов при оценке сейсмической опасности горных территорий. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2008. – № 3. – С. 49-52.

8. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Габараев А. Ф., Мерзликини 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
9. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Никонова Н. В., Смирнова Л. Н., Уздин А. М. Характеристики пространственной неоднородности поля ускорений дневной поверхности. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2022а. – Т. 12 (1). – С. 75-88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006
10. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Фидарова М. И. Взаимосвязь величины макросейсмической интенсивности с показателями инструментальных записей Губанского землетрясения 2000 г. и Тбилисских землетрясений 2002 г. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2022б. – Т. 12 (1). – С. 89-108. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.23.007
11. Николаев А. В. Сейсмические свойства рыхлой среды. // *Физика Земли*. – 1967. – № 2. – 1967. – С. 23-31.
12. Николаев А. В. Проблемы нелинейной сейсмологии. Проблемы нелинейной сейсмологии. – М.: Наука, 1987. – С. 2-5.
13. Полтавцев С. И., Айзенберг Я. М., Уломов В. И. и др. Сейсмическое районирование и сейсмостойкое строительство (Методы, практика, перспективы). – М: ГУП ЦПП, 1998. – 259 с.
14. Akansel V., Ameri G., Askan A., Caner A., Erdil B., Kale Ö., Okuyucu D. The 23 October 2011 Mw7.0 Van (Eastern Turkey) earthquake: Interpretations of recorded strong ground motions and post-earthquake conditions of nearby structures. // *Earthq. Spectra*. – 2014. – Vol. 30. – pp. 657-682.
15. Bilal M., Askan A. Relationships between felt intensity and recorded ground-motion parameters for Turkey. // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 2014. – Vol. 104. – pp. 484-496.
16. Bonnet G., Heitz J.F. Non-linear seismic response of a soft layer. // 10-th European conference on Earthquake Engineering. Duma (et). Balkema, Rotterdam, ISBN 9054105283. – 1995. – pp. 361-364.
17. 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.
18. Ganapathy G. P., Zaalishvili V. B., Chandrasekaran S. S., Melkov D. A. Integrated monitoring of slope processes in India and Russia. // *Sustainable Development of Mountain Territories*. – 2020. – Vol. 12. No. 4 (46). – pp. 572-581. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-572-581. – EDN NMMAEJ.
19. Gutenberg B., Richter C. F. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 1956. – Vol. 46. – pp. 105-145.
20. Hardin B. O., Drnevich V. P. Shear Modulus and Damping in Soils: II. Design Equations and Curves. // *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*. – 1972. – Vol. 98. No. 7. – pp. 667-691.
21. Musson R. M. W., Grünthal G., Stucchi M. The comparison of macroseismic intensity scales. // *J. Seismol.* – 2009. – No. 14. – pp. 413-428.
22. Seed H. B., Idriss I. M. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis. // Report No. UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December. – 1970. – 48p.
23. Seed H. B., Sun J. H. Implication of site effects in the Mexico City earthquake of September 19, 1985 for Earthquake-Resistant Design Criteria in the San Francisco Bay Area of California. // Report No. UCB/EERC-89/03, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. – 1989.
24. Seed H. B., Wong R. T., Idriss I. M. and Tokimatsu K. Moduli and Damping factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils. // *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*. – 1986. – Vol. 11 (2). No. GTI 1, November. – pp. 1016-1032.

25. 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.
26. 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.
27. Zaalishvili V. B. Spectral characteristics of seismic waves at strong ground motions. // *International Journal of GEOMATE.* – 2016. – Vol. 10 (2). – pp. 1706-1717. DOI:10.21660/2016.20.5310
28. Zaalishvili V. B., Chotchaev Kh. O., Melkov D. A. et al. Geodetic, geophysical and geographical methods in landslide investigation: Luar case study. // *E3S Web of Conferences: Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE, Moscow, 20-22 Nov. 2019.* – Vol. 164. – Moscow: EDP Sciences, 2020a. – p. 01014. DOI 10.1051/e3sconf/202016401014. – EDN IJJZPB.
29. 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.* – 2020b. – Vol. 10 (3). – pp. 94-113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006

References

1. Bate K., Wilson E. Numerical methods of analysis and finite element method. Moscow. Stroyizdat. 1982. 448 p. (In Russ.)
2. Gvozdev A. A., Kuznetsov V. V. On the phenomenon of partial spalling. *Izvestia AS of the USSR, Physics of the Earth.* 1977. No. 2. pp. 21-27. (In Russ.)
3. Zaalishvili V. B. The use of a powerful gas-dynamic source for the study of vibrations in the soil stratum. *Bulletin of the Academy of Sciences of the Georgian SSR.* 1983. Vol. 109. No. 2. pp. 345. (In Russ.)
4. Zaalishvili V. B. Experience in the application of the instrumental method of seismic microzonation. *Seismic microzonation of cities and large construction sites.* Tbilisi. Metsniereba. 1987. pp. 65-85. (In Russ.)
5. Zaalishvili V. B. Seismic microzonation of urban territories, settlements and large building sites. Moscow. Nauka. 2009. 350 p. (In Russ.)
6. Zaalishvili V. B., Dzhavrishvili I. A., Otinashvili M. G. Calculation of nonlinear vibrations of soil strata using the numerical method of FEM of seismic microzonation. *Theory of structures and seismic stability.* No. 1. ISMIS after K. S. Zavriev. Tbilisi. 2001. pp. 67-73. (In Russ.)
7. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Otinashvili M. G. Using the finite element method in the seismic hazard assessment of mountain areas. *Earthquake engineering. Constructions safety.* 2008. No. 3. pp. 49-52. (In Russ.)
8. 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 (4). pp. 70-82. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006.
9. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Nikonova N. V., Smirnova L. N., Uzdin A. M. Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field on the day surface. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2022. Vol. 12 (1). pp. 75-88. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006.
10. 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 (1). pp. 89-108. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.74.23.007.
11. Nikolaev A. V. Seismic properties of a loose medium. *Physics of the Earth.* 1967. No. 2. 1967. pp. 23-31. (in Russ.)
12. Nikolaev A. V. Problems of nonlinear seismicity. Moscow. Nauka. 1987. pp. 2-5. (in Russ.)

13. Poltavtsev S.I., Aizenberg Ya.M., Ulomov V.I. et al. Seismic zoning and earthquake engineering (Methods, practice, prospects). Moscow. GUP TsPP. 1998. 259 p. (in Russ.)
14. Akansel V., Ameri G., Askan A., Caner A., Erdil B., Kale Ö., Okuyucu D. The 23 October 2011 Mw7.0 Van (Eastern Turkey) earthquake: Interpretations of recorded strong ground motions and post-earthquake conditions of nearby structures. *Earthq. Spectra*. 2014. Vol. 30. pp. 657-682.
15. Bilal M., Askan A. Relationships between felt intensity and recorded ground-motion parameters for Turkey. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2014. Vol. 104. pp. 484-496.
16. Bonnet G., Heitz J.F. Non-linear seismic response of a soft layer. In: 10-th European conference on Earthquake Engineering. Duma (et). Balkema, Rotterdam, ISBN 9054105283. 1995. pp. 361-364.
17. 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.
18. Ganapathy G.P., Zaalishvili V.B., Chandrasekaran S.S., Melkov D.A. Integrated monitoring of slope processes in India and Russia. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020. Vol. 12. No. 4. pp. 572-581. DOI 10.21177/1998-4502-2020-12-4-572-581. EDN NMMAEJ.
19. Gutenberg B., Richter C.F. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1956. Vol. 46. pp. 105-145.
20. Hardin B.O., Drnevich V.P. Shear Modulus and Damping in Soils: II. Design Equations and Curves. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*. 1972. Vol. 98. No. 7. pp. 667-691.
21. Musson R.M. W., Grünthal G., Stucchi M. The comparison of macroseismic intensity scales. *J. Seismol.* 2009. No. 14. pp. 413-428.
22. Seed H.B., Idriss I.M. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis. Report No. UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December. 1970. 48 p.
23. Seed H.B., Sun J.H. Implication of site effects in the Mexico City earthquake of September 19, 1985 for Earthquake-Resistant Design Criteria in the San Francisco Bay Area of California. Report No. UCB/EERC-89/03, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. 1989.
24. Seed H.B., Wong R.T., Idriss I.M. and Tokimatsu K. Moduli and Damping factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*. 1986. Vol. 11. No. GTI 1, November. pp. 1016-1032.
25. 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.
26. 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.
27. Zaalishvili V.B. Spectral characteristics of seismic waves at strong ground motions. *International Journal of GEOMATE*. 2016. Vol. 10. pp. 1706-1717. DOI:10.21660/2016.20.5310.
28. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O., Melkov D.A. et al. Geodetic, geophysical and geographical methods in landslide investigation: Luar case study. *E3S Web of Conferences: Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE, Moscow, 20-22 Nov2019*. Vol. 164. Moscow: EDP Sciences, 2020a. p. 01014. DOI 10.1051/e3sconf/202016401014. EDN IJJZPB.
29. 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*. 2020b. Vol. 10 (3). pp. 94-113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006.

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34

DOI: [10.46698/VNC.2022.32.20.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.32.20.007)

Оригинальная статья

Некоторые новые данные о влиянии различных грунтовых условий на вероятностные оценки сейсмической опасности территорий

Ю. К. Чернов¹, В. Б. Заалишвили¹, А. Ю. Чернов²

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

²Инженерный институт ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» Россия, 355029, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2

Статья поступила: 31.10.2022, доработана: 24.11.2022, одобрена в печать: 05.12.2022

Резюме: Актуальность работы. В свете новых данных о спектрах колебаний грунта при землетрясениях рассмотрены важные с научной и практической точек зрения вопросы учета «грунтового» фактора в качестве одной из основных составляющих вероятностного анализа сейсмической опасности (*probabilistic seismic hazard analysis* или *PSHA*) территорий. **Цель исследования.** Изучение влияния установленных ранее различий в спектрах колебаний разных типов грунтов при землетрясениях разной величины и удаленности на результирующие вероятностные оценки сейсмической опасности территорий в конкретных сейсмогеологических условиях. **Методы исследования.** Работа основана на сопоставлении функций распределения вероятностей макросейсмической интенсивности сотрясений, полученных по результатам *PSHA* территории РСО-Алания. Сравнивались оценки, выполненные отдельно для «мягких» и «твердых» грунтов. Используемые в расчетах модели сейсмичности идентичны моделям, разработанным для детального сейсмического районирования этой территории. В качестве моделей сильных движений использованы разработанные в процессе предыдущих исследований новые эмпирические функции затухания спектров «мягких» и «твердых» грунтов. Итоговые оценки макросейсмической интенсивности получены пересчетом из вероятных спектров колебаний грунта. **Результаты исследования.** В рамках *PSHA* для средних периодов сотрясаемости 500, 1000, 2500 и 5000 лет произведены оценки и картирование по площади возможных на территории РСО-Алания макросейсмических интенсивностей сотрясений в условиях «мягких» и «твердых» грунтов с последующим определением разностей между ними. Значения этих разностей («приращений балльности») меняются от места к месту. Кроме того, они зависят от средних периодов повторяемости сотрясений. Размер этих вариаций может достигать 0,8 баллов *MSK*, что является достаточно большой величиной с практической точки зрения. Изменчивость «приращений балльности» показывает, что вероятностные оценки сейсмических воздействий с учетом местных грунтовых условий, выполняемые на основе распространенных в РФ «двухступенчатых» расчетных схем (где сначала дается «фоновая» интегральная вероятностная оценка, в которую затем вводится некоторая фиксированная «грунтовая» поправка), не являются корректными и могут содержать значительные погрешности. Более перспективными в данном отношении являются «одноступенчатые» схемы, когда реакции разных типов грунтов учитываются уже на первом этапе (т. е. до получения интегральных оценок) путем разработки соответствующих моделей сильных движений грунта.

Ключевые слова: вероятностные оценки сейсмической опасности, сейсмические свойства «мягких» и «твердых» грунтов, спектры колебаний грунта, сейсмическое микрорайонирование.

Для цитирования: Чернов Ю. К., Заалишвили В. Б., Чернов А. Ю. Некоторые новые данные о влиянии различных грунтовых условий на вероятностные оценки сейсмической опасности территорий. *Геология и Геофизика Юга России*. 2022. 12 (4): 85-100. DOI: [10.46698/VNC.2022.32.20.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.32.20.007).

GEOPHYSICS

DOI: [10.46698/VNC.2022.32.20.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.32.20.007)

Original paper

Some new data on the influence of various soil conditions on probabilistic seismic hazard assessment of territories

Y. K. Chernov¹, V. B. Zaalishvili¹, A. Y. Chernov²

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

²Institute of Construction in the North-Caucasian Federal University, Stavropol Krai, 2 Kulakov Str., Stavropol 355029, Russian Federation

Received: 31.10.2022, revised: 24.11.2022, accepted: 05.12.2022

Abstract: Relevance. The issues of taking “ground” factor into account as one of the main components of probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) of territories, important from scientific and practical points of view, are considered in the light of the recent data on the ground vibration spectra during earthquakes. **Aim.** Study of the influence of the previously identified differences in the vibration spectra of various types of soils during earthquakes with different magnitude and distance on the resulting probabilistic assessments of the seismic hazard of territories in specific seismogeological conditions. **Methods.** The work is based on a comparison of the probability-distribution functions of the macroseismic intensity of ground motions, obtained from the PSHA results for the North Ossetia-Alania territory. The assessments carried out separately for “soft” and “hard” soils were compared. The seismicity models used in the calculations are identical to the models developed for the detailed seismic zoning of this territory. New empirical attenuation functions of spectra of “soft” and “hard” soils, developed during the previous studies, were used as strong motion models. The final assessments of macroseismic intensity were obtained by recalculation of the probable spectra of ground vibrations. **Results.** Within the framework of PSHA, for average periods of ground motions of 500, 1000, 2500 and 5000 years, assessment and mapping of the area of possible macroseismic intensities in the territory of North Ossetia-Alania under “soft” and “hard” soil conditions were made, followed by determination of the differences between them. The values of these differences (“intensity increments”) vary from place to place. In addition, they depend on the average return periods of ground motions. The size of these variations can be up to 0.8 intensity of MSK-scale, which is quite a large value from a practical point of view. The variability of “intensity increments” shows that probabilistic assessments of seismic impacts, taking local soil conditions into account, performed on the basis of the “two-stage” calculation schemes common in the Russian Federation (where a “background” integral probabilistic assessment is first given, and then some fixed “soil” correction is introduced to it), are not correct and may contain significant errors. More promising in this regard are “single-stage” schemes, when the reactions of different soil types are taken into account already at the first stage (i. e., before the integral assessments obtaining) by developing appropriate models of strong ground motions.

Keywords: probabilistic seismic hazard assessment, seismic properties of “soft” and “hard” soils, ground vibration spectra, seismic microzonation.

For citation: 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. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (4): 85-100. DOI: [10.46698/VNC.2022.32.20.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.32.20.007).

Введение

Основные характеристики движений поверхности Земли при землетрясениях (макросейсмическая интенсивность сотрясений, амплитудный уровень и спектраль-

ный состав колебаний, их длительность и др.), определяющие уровень опасности этих землетрясений, зависят от местных грунтовых условий. Как показывают начавшиеся еще с исторических времен наблюдения, влияние «грунтового фактора» на общий негативный эффект от землетрясений весьма велико и находится в одном ряду с такими определяющими показателями, как величина (магнитуда) и удаленность землетрясения. Поэтому изучение различных аспектов формирования поля сильных движений грунта (СДГ) в различных инженерно-геологических условиях традиционно является одним из основных направлений исследований в области инженерной сейсмологии. Особенно глубоко и результативно эти исследования стали проводиться после появления специальных систем инструментальной регистрации сильных землетрясений. Среди наиболее крупных работ, подводящих итоги первых десятилетий таких исследований и указывающих перспективы на будущее можно отметить труд выдающегося ученого (которого многие считают отцом европейской инженерной сейсмологии) С.В. Медведева [Медведев, 1962]. Этому направлению большое внимание уделяли в своих исследованиях многие отечественные и зарубежные исследователи (см. обзоры и отдельные работы [Саваренский, 1972; Напетваридзе, 1973; Сейсмическое..., 1977; Сейсмический..., 1981; Аки, Ричардс, 1983; Ризниченко, 1985; Штейнберг, 1986; Оценка..., 1988; Чернов, 1989; Ратникова и др., 1988; Штейнберг и др., 1993; Кригер и др., 1994; Заалишвили, 2009; Atkinson, Boore, 2011; Campbell, Bozorgnia, 2014; Akkar et al., 2014; Beven et al., 2015; Алешин, 2017; Калинина и др., 2017; Sokolov, Sahran, 2018; Bora et al., 2019]). К настоящему времени уже создана общая научная база и выявлены основные элементы данного природного явления. В то же время ещё остаются отдельные вопросы, относящиеся к данной тематике. В частности, это относится к использованию вышеупомянутых знаний в практических целях. Так, например, несмотря на понимание того, что реакция грунта на входное сейсмическое воздействие сложным образом зависит от многих факторов (частоты сейсмического сигнала, геометрии границ слоев, углов подхода сейсмических волн, неупругих свойств реальных грунтов и др.) в большинстве случаев отечественные (и не только) нормативно-методические документы содержат рекомендации, сводящиеся к использованию некоторых констант, упрощенным способом учитывающих влияние расчетной грунтовой толщи (см., например, [Заалишвили и др., 2018; 2022]). Это связано, в том числе, с тем обстоятельством, что вышеуказанные зависимости достаточно сложны и определяются большим количеством входящих в них параметров, определение которых обычно затруднительно при проведении рутинных оценок сейсмической опасности.

В связи с этим в ряде инженерно- сейсмологических исследований (см. выше) предлагаются различные усовершенствования процедур учета грунтовых условий, направленные на то, чтобы повысить точность прогнозных оценок, не усложняя их выше некоторого приемлемого уровня. Одна из попыток продвинуться в этом вопросе предпринята и нами (см. [Чернов, 2022]). В этой работе описан первый этап начатых в данном направлении исследований. Основным результатом здесь стали полученные на основе достаточно представительного статистического материала эмпирические функции затухания уровней спектральной плотности Фурье ($|S|$) в зависимости от ограниченного и доступного для рутинного применения набора параметров – магнитуды землетрясения (M), расстояния до очага (D) и частоты спектральной составляющей (f). Оценки $|S|$ (M, D, f) в виде соответствующих функций распределения вероятностей выполнены отдельно для двух групп землетрясений,

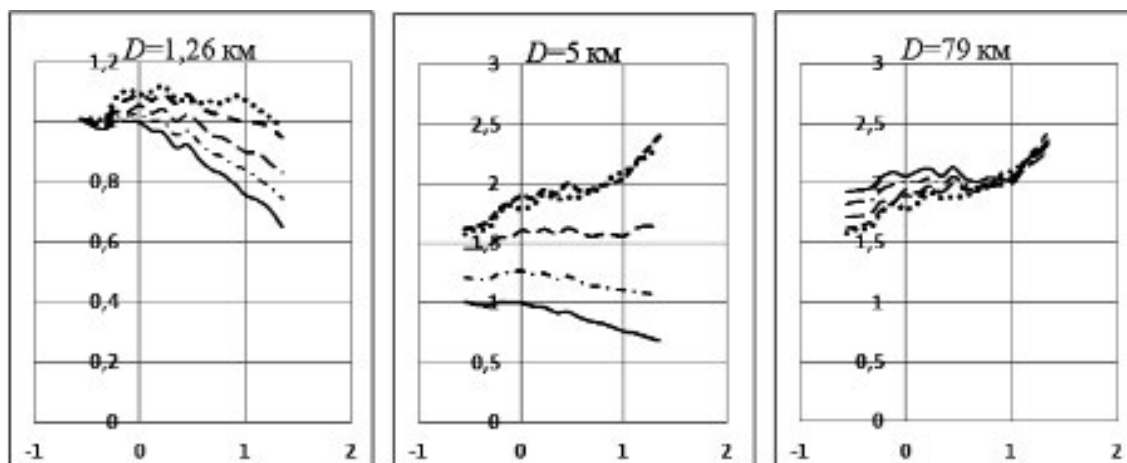


Рис. 1. Примеры наиболее вероятных спектральных характеристик «мягких» грунтов по отношению к «твердым» грунтам (f – ось ординат) на различных расстояниях до очага (D), рассчитанных для землетрясений разных магнитуд – сплошная линия, штрих-пунктир, длинный пунктир, короткий пунктир и точечная линии оценки для землетрясений с $M = 7, 6, 5, 4$ и 3 , соответственно. Ось абсцисс – логарифм частоты в Гц /

Fig. 1. Examples of the most probable spectral characteristics of “soft” soils in relation to “hard” soils (f – the y-axis) at different distances to the source (D), calculated for earthquakes with different magnitudes – a solid line, a dot-dash line, a long dotted line, short dotted line and dotted line of the assessments for earthquakes with $M = 7, 6, 5, 4$ and 3 , respectively. The x-axis – logarithm of frequency in Hz

различающихся грунтовыми условиями в пункте регистрации. Эти две группы грунтовых условий объединены под названиями «мягкие» и «твердые» грунты. Построенные функции затухания оказались существенно различными для «мягких» и «твердых» грунтов и для разных значений M, D, f , что приводит к тому, что соотношения уровней спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов не являются константой, а сложным образом меняются при изменении M, D, f , что отлично от вышеупомянутых стандартных оценок, применяемых на практике. Сказанное наглядно иллюстрируется рисунком 1.

Очевидно, что использование подобных моделей СДГ в расчетах сейсмической опасности будет корректировать прогнозные оценки по сравнению с теми, что обычно используются на практике. Ответам на некоторые из вопросов о том, в каких сейсмогеологических условиях и в какой степени эти новые функции затухания влияют на конечные оценки сейсмической опасности и насколько это важно с практической точки зрения и посвящена настоящая работа, являющаяся продолжением начатых в [Чернов, 2022] исследований, чем и определяется ее актуальность и новизна, а также цель и практическая значимость.

Информационная база и методика исследований

Работа базируется на результатах вероятностного анализа сейсмической опасности (*probabilistic seismic hazard analysis* или *PSHA*), в качестве примера, выполненного для территории РСО-Алания. При этом применена та же расчетная схема, что и при оценках возможных сейсмических воздействий для детального сейсмического районирования (ДСР) данной территории (подробнее см. [Чернов, 2021]). Здесь укажем лишь, что в настоящей работе анализируются оценки, рассчитанные в рамках формулы полной вероятности, где условная вероятность описывает не-

определенности, связанные с прогнозированием параметров колебаний грунта при возникновении очага землетрясения, а безусловная – неопределенности возникновения этого очага в данном месте в заданный промежуток времени. Итоговая оценка при этом представляет собой вероятностную суперпозицию воздействий всех потенциально опасных очагов землетрясений с учетом их повторяемости.

При производстве вышеуказанных построений используются исходные данные, соответствующие двум типам участвующих в расчетах моделей – моделей локальной сейсмичности и моделей СДГ. Модели сейсмичности (модели зон ВОЗ, оценки размеров, механизмов и ориентации в пространстве очагов потенциально опасных землетрясений разных магнитуд, распределение очагов землетрясений разных магнитуд по глубине, их повторяемость во времени) для рассматриваемой территории приведены в [Чернов и др., 2018]. В качестве моделей СДГ используются новые вероятностные функции затухания спектров Фурье ускорений колебаний «мягких» и «твердых» грунтов, подробно описанные в [Чернов, 2022]. Здесь лишь отметим, что данные модели представляют собой статистические аппроксимации большого объема эмпирических данных (около 3400 спектров) колебаний грунта, зарегистрированные при землетрясениях с $M=2,5-7,3$ и $D=1-658$ км в различных грунтовых условиях, условно разделенных на две группы – «мягкие» и «твердые» грунты. Под терминами «мягкие» и «твердые» подразумеваются грунты, которые могут быть отнесены (с известной долей точности, конечно) к грунтам, соответственно, II и I категорий СНиП по сейсмическим свойствам.

Учитывая, что в отечественных нормативно-методических документах уровень сейсмической опасности выражается в виде баллов макросейсмической шкалы, в настоящей работе также сделаны оценки вероятных интенсивностей сотрясений (I) по 12-тибалльной шкале *MSK*. Исследования осуществлены в несколько этапов. Сначала в каждой из расчетных точек, расположенных в границах территории РСО-Алания и на прилегающих участках с шагом по сетке 5×5 км произведены оценки функций распределения вероятностей случайной величины I , которые рассчитывались через спектр Фурье ускорений колебаний грунта (см. [Чернов, 2022]) по формуле:

$$P[I \leq i] = \prod_{j=i}^{12} \prod_{f=f_{\max}}^{f_j} \left(1 - \frac{1}{\sigma_{j,f} \sqrt{2\pi}} \int_{x_{\min}}^{x_{j,f}} e^{-\frac{(x-a_{j,f})^2}{2\sigma_{j,f}^2}} dx \right)^{k_f} \quad (1)$$

где $a_{j,f}$ и $\sigma_{j,f}$ обозначают, соответственно, значения и стандарты величин $x=|g|S|$ приписанных балльности $I=j$ на частотах, «ответственных» за интенсивность сотрясений f_j , а также средние значения и стандарты величин $x=|g|S|$, приписанных балльности $I=i, f$ на частотах f , больших, чем частота, «ответственная» за сейсмический эффект данной силы $I=j$; $x_{j,f}$ – значение логарифма наблюдаемого спектра на частотах f_j , а также на частотах больших частоты, «ответственной» за балльность $I=j$; $x_{\min}$ – так же как и в выражении (1.6) равно $a_{j,f} - 5\sigma_{j,f}$; k_f – показатель степени, равный единице для частот, «ответственных» за макросейсмический эффект I_j , и меньше единицы для частот, больших, чем частота f_j , для которых $k_f \approx k_g/k_i$, когда k_g – эмпирически определяемый коэффициент линейной регрессии $|g|S|$ на I для частоты f_j .

В связи с тем, что в данном случае интенсивность сотрясений оценивается не по результатам прямых макросейсмических обследований, а посредством пересче-

тов через спектр Фурье колебаний грунта, то далее (также, как в [Чернов, 2021] и других наших предыдущих работах) будем называть получаемые с помощью выражения (1) оценки спектральной балльности ($I_{сп}$).

На следующем этапе по полученным функциям распределения (1) оценивались значения $I_{сп}$, вероятность не превышения которых в данных расчетных точках за время экспозиции 50 лет составляет 0,9; 0,95; 0,98 и 0,99, что согласно принятым пуассоновским моделям распределения землетрясений во времени, соответствует средним периодам повторяемости превышений этих уровней $t=500$, 1000, 2500 и 5000 лет. Такие построения выполнены отдельно для «мягких» и «твердых» грунтов.

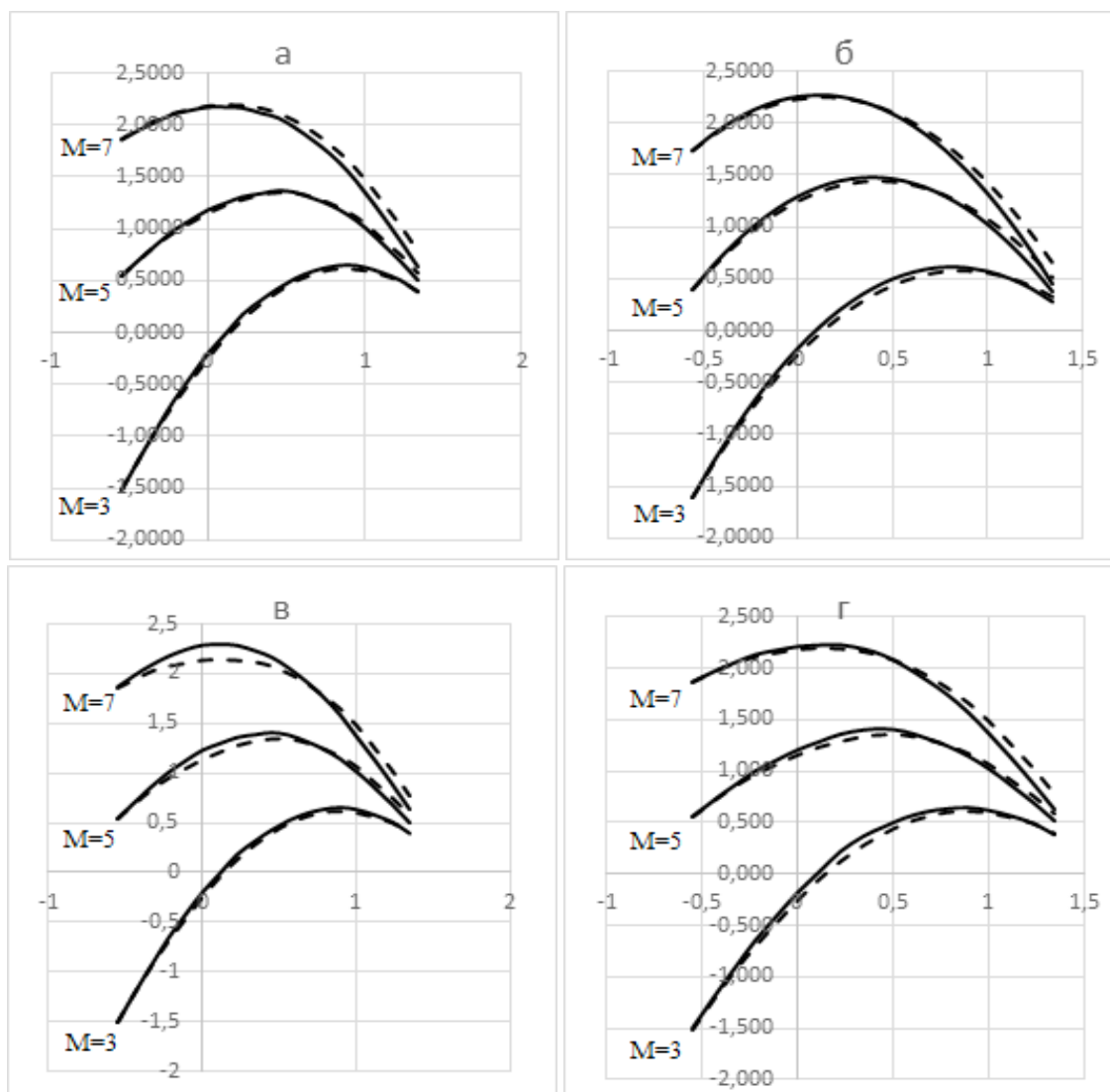


Рис. 2. Наиболее вероятные значения спектральной плотности Фурье ускорений колебаний «мягких» (сплошная линия) и «твердых» (пунктирная линия) грунтов в ближней зоне землетрясений разных магнитуд (M), соответствующие Вариантам 1, 2, 3 и 4 (индексы а, б, в, г, соответственно). Ось ординат – $\lg|S|$ в см/с; ось абсцисс – $\lg f$ в Гц /

Fig. 2. The most probable values of the Fourier spectral density of vibration accelerations of “soft” (solid line) and “hard” (dashed line) soils in the near zone of earthquakes of different magnitudes (M), corresponding to Variants 1, 2, 3 and 4 (indices а, б, в, г, respectively). The y-axis is $\lg|S|$ in cm/s; the x-axis – $\lg f$ in Hz

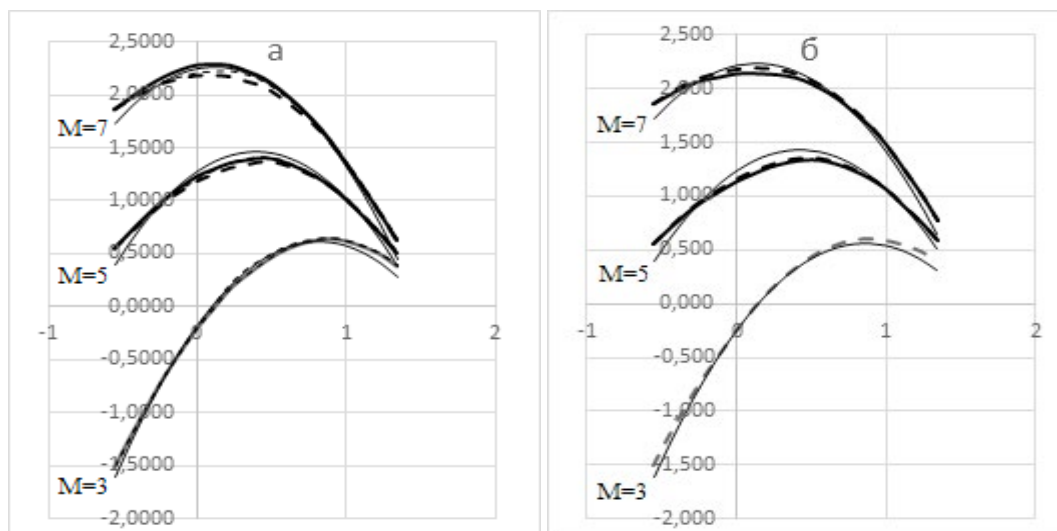


Рис. 3. Сравнение различных вариантов наиболее вероятных спектров Фурье ускорений колебаний «мягких» (а) и «твердых» (б) грунтов, в ближних зонах землетрясений разных магнитуд (цифры около кривых). Варианты 1, 2, 3 и 4 – толстый пунктир, тонкая линия, толстая линия и тонкий пунктир, соответственно. Ось абсцисс – $\lg f$ (Гц); ось ординат – $\lg |S|$ (см/с) /

Fig. 3. Comparison of various variants of the most probable Fourier spectra of vibration accelerations of “soft” (a) and “hard” (b) soils in the near zones of earthquakes with different magnitudes (numbers near the curves). Variants 1, 2, 3 and 4 are denoted by thick dotted line, thin line, thick line and thin dotted line, respectively. The x-axis is $\lg f$ (Hz); the y-axis – $\lg |S|$ (cm/s)

Далее для каждой расчетной точки определялись разности в значениях $I_{\text{сп}}$, полученных для «мягких и «твердых» грунтов ($\Delta I_{\text{сп}} MSK$) при одинаковых значениях $t=500, 1000, 2500$ и 5000 лет.

И, наконец, в качестве итогового построения по этим определенным для каждой из расчетных точек разностям произведено зонирование рассматриваемой территории РСО-Алания и прилегающих участков по величинам $\Delta I_{\text{сп}} MSK$, рассчитанным для разных периодов повторяемости $t=500, 1000, 2500$ и 5000 лет. Выделение зон с различными уровнями $\Delta I_{\text{сп}}$ сделано при помощи изолиний, проводимых с шагом $0,2$ балла MSK .

Для оценки чувствительности производимых вероятностных оценок $\Delta I_{\text{сп}}$ к варируемости функций $|S| (M, D, f)$ наряду с первоначальными оценками этих функций из [Чернов, 2022], которые в дальнейшем обозначаются как Вариант 1, дополнительно рассмотрены еще три, несколько отличных от Варианта 1. варианта пар таких функций затухания для «мягких» и «твердых» грунтов (см. рис. 1 и 2).

Вариант 2 построен на базе исходного массива данных, но с использованием иного, чем в работе [Чернов, 2022] способа их аппроксимации. Здесь зависимости $|S| (M, f)$ в ближней зоне землетрясений разных магнитуд строились в виде $\lg |S| = a \ln M + b$, где в рассматриваемых диапазонах магнитуд и частот для «мягких» грунтов:

$$a = -1,978 \lg f + 2,853 \quad \text{и} \quad b = -1,199 (\lg f)^2 + 4,122 \lg f - 3,305 \quad (2)$$

для «твердых» грунтов:

$$a = -1,877 \lg f + 2,909 \quad \text{и} \quad b = -1,092 (\lg f)^2 + 3,945 \lg f - 3,436 \quad (3)$$

В выражениях (2) и (3) $|S|$ в см/с.

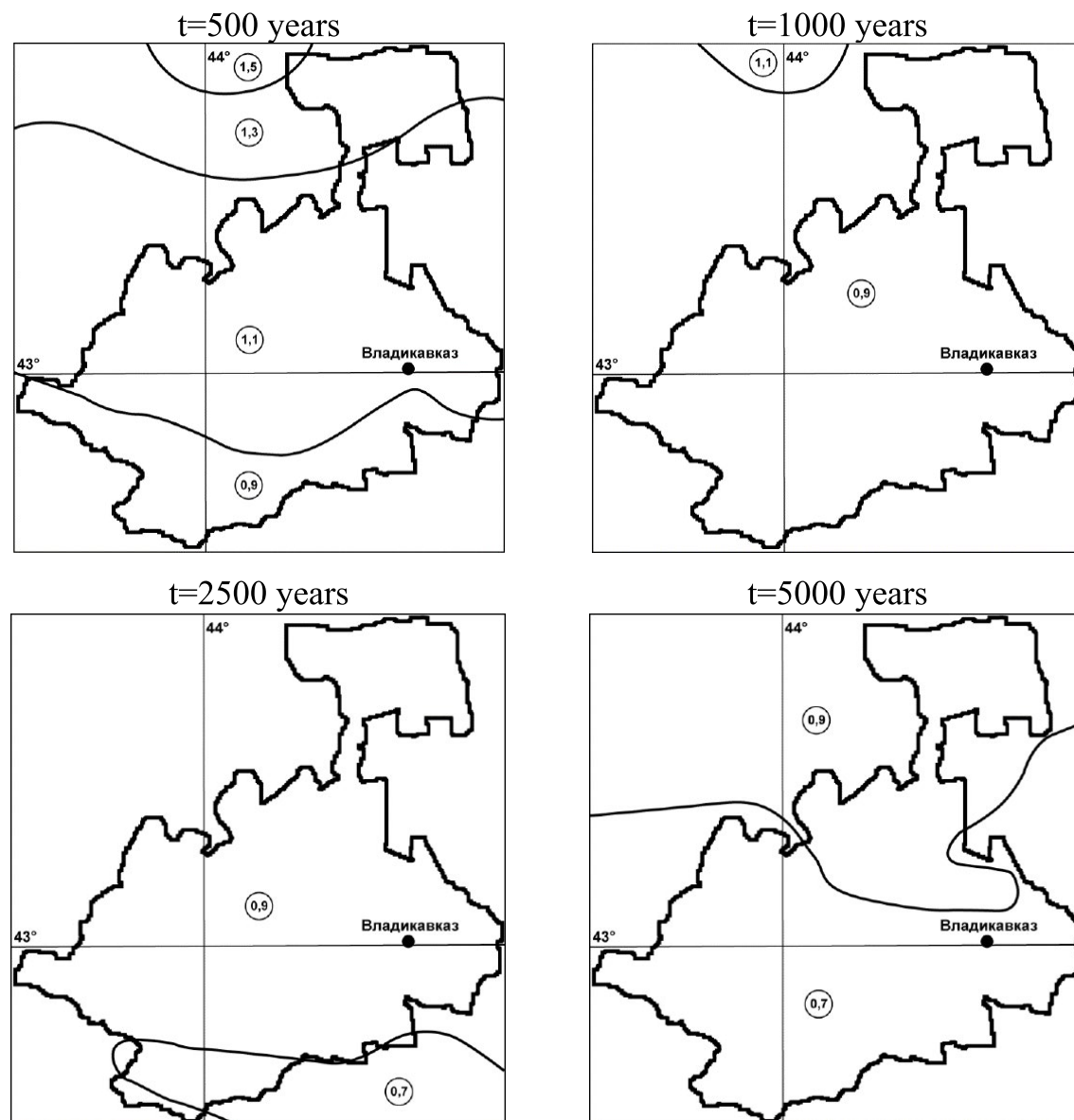


Рис. 4. Зонирование рассматриваемой территории по вероятным значениям ΔI_{sp} для разных средних периодов повторяемости сотрясений t с использованием функций затухания $|S|$ (M, D, f) по Варианту 1. Толстая линия – граница РСО-Алания, тонкие линии – границы зон с разными значениями ΔI_{sp} . Цифры в кружках – средние по зоне значения ΔI_{sp} в баллах MSK /
 Fig. 4. Zoning of the considered territory according to the probable values of ΔI_{sp} for different average return periods of ground motions t using the attenuation functions $|S|$ (M, D, f) according to the Variant 1. The thick line denotes the boundaries of RNO-Alania, the thin lines – the boundaries of zones with different values of ΔI_{sp} . The numbers in circles denote the average for the zone values of ΔI_{sp} in MSK intensity scale

Варианты 3 и 4, используются в целях численного эксперимента и представляют собой корректировку Вариантов 1 и 2.

В Варианте 3 уровни спектров для «мягких» грунтов в ближней зоне землетрясений с $M=7$ в области их максимальных значений (на частотах $\sim 1,3$ Гц) повышены примерно на 30% по сравнению с Вариантом 1. Для других магнитуд и частот данное превышение постепенно снижается до нуля. Спектры «твердых» грунтов в данном варианте построены схожим образом, с той разницей, что в области макси-

мальных частот спектр по Варианту 3, наоборот, снижен по отношению к аналогичной оценке по Варианту 1 примерно на 6%.

В Варианте 4 логарифмы уровней спектров «мягких» грунтов в ближней зоне землетрясений приняты равными средним значениям между оценками по Вариантам 1 и 3. Спектры для «твердых» грунтов здесь приняты такими же, как в Варианте 1.

Кроме уровней спектров в ближних зонах все остальные характеристики функций затухания спектров с расстоянием (размеры ближних, переходных и дальних

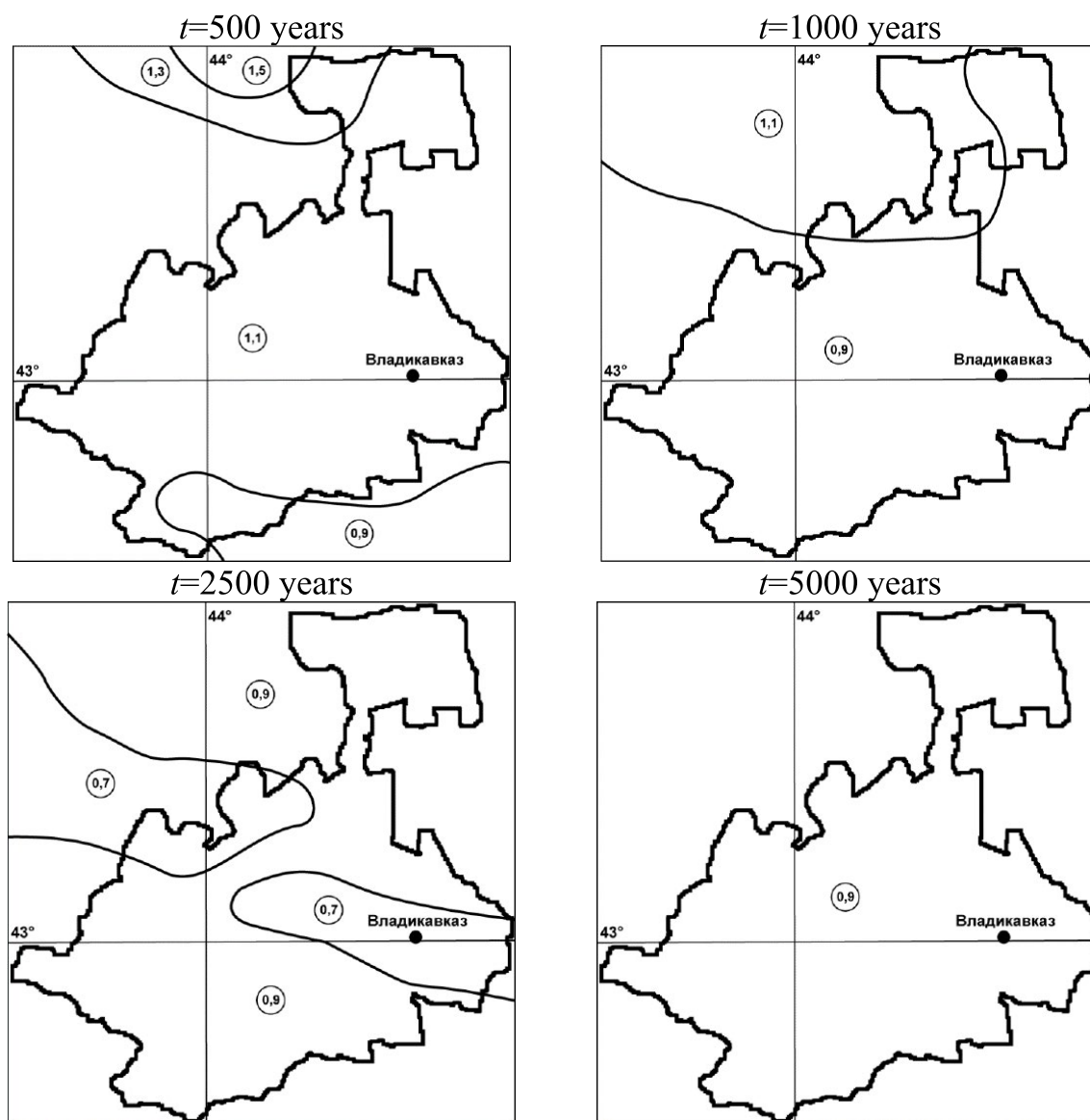


Рис. 5. Зонирование рассматриваемой территории по вероятным значениям ΔI_{sp} для разных средних периодов повторяемости сотрясений t с использованием функций затухания $|S|$ (M , D , f) по Варианту 2. Толстая линия – граница РСО-Алания, тонкие линии – границы зон с разными значениями ΔI_{sp} . Цифры в кружках – средние по зоне значения ΔI_{sp} в баллах MSK /

Fig. 5. Zoning of the considered territory according to the probable values of ΔI_{sp} for different average return periods of ground motions t using the attenuation functions $|S|$ (M , D , f) according to the Variant 2. The thick line denotes the boundaries of RNO-Alania, the thin lines – the boundaries of zones with different values of ΔI_{sp} . The numbers in circles denote the average for the zone values of ΔI_{sp} in MSK intensity scale

зон, подзон дальней зоны, коэффициенты затухания на разных частотах) в Вариантах 2-4 приняты такими же, как и в описанном в [Чернов, 2022] базовом Варианте 1.

Результаты работы и их обсуждение

На рисунках 3, 4 и 5 показаны результаты зонирования территории РСО-Алания и прилегающих районов по вероятным значениям $\Delta I_{\text{сп}}$, выполненного с использованием разных вариантов функций затухания $|S| (M, D, f)$. Рисунками 3 и 4 оценки, произведенные с помощью функций $|S| (M, D, f)$, аппроксимирующих данные реальных наблюдений (Варианты 1 и 2), проиллюстрированы в полном объеме, т.е. для всех рассматриваемых значений $t=500, 1000, 2500$ и 5000 лет. Оценки же, с применением функций $|S| (M, D, f)$, соответствующих Вариантам 3 и 4 показаны не все, а только те, которые получены для $t = 500$ лет. Это сделано во избежание перегрузки статьи иллюстративным материалом и с учетом того, что вариации расчетных значений $\Delta I_{\text{сп}}$ и в таком виде (см. рис. 5) прослеживаются достаточно четко.

Проиллюстрированные рисунками 3-5 результаты выполненных построений позволяют выделить два основных момента. Первый – это наблюдаемая в пределах рассматриваемой территории площадная вариабельность вероятных значений «интегральных приращений балльности» «мягких» грунтов по сравнению с «твердыми» грунтами ($\Delta I_{\text{сп}}$), которая, в свою очередь также изменяется в зависимости от среднего периода повторяемости сотрясений (t). Второй – это размер таких флуктуаций, который в наших опытах, например, для средних периодов повторяемости $t=500$ лет, может достигать 0,8 балла *MSK*, что уже является достаточно существенной величиной с практической точки зрения. Если же сравнивать между собой оценки $\Delta I_{\text{сп}}$ по всем вариантам расчетов и по всем рассмотренным средним периодам сотрясений ($t=500-5000$ лет), то величина вариаций $\Delta I_{\text{сп}}$ становится еще больше и в нашем случае может достигать 1,2 балла *MSK*.

Оценивая реалистичность полученных оценок $\Delta I_{\text{сп}}$ можно, отметить, что они достаточно адекватным образом реагируют, например, на изменения в исходных спектрах колебаний. Так, при возрастании разницы между уровнями спектров «мягких» и «твердых» грунтов на 20-40% (рис. 2), значения $\Delta I_{\text{сп}}$ также увеличиваются на 0,3-0,4 балла *MSK*. При этом площадная изменчивость и зависимость от t расчетных разностей $\Delta I_{\text{сп}}$ сохраняется примерно на том же уровне. В пользу реалистичности настоящих оценок говорит также близость значений $I_{\text{сп}}$, рассчитанных в настоящей работе для «мягких» грунтов к вероятностным оценкам макросейсмической интенсивности сотрясений, полученным при ДСР территории РСО-Алания. Средние значения и стандартные отклонения поточечных различий варьируют здесь в пределах 0,03-0,06 и 0,03-0,05 баллов *MSK*, соответственно. Далее. Средневзвешенные по всей рассматриваемой территории значения $\Delta I_{\text{сп}}$ для разных частот, периодов повторяемости сотрясений и вариантов расчетов варьируют в пределах 0,82-1,14 балла *MSK* при изменении оцененных по исходным функциям затуханий средних значений $\Delta \lg |S| (M, D, f) = \lg |S| (M, D, f)_{\text{мяг. гр.}} - \lg |S| (M, D, f)_{\text{тв. гр.}}$ от 0,243 до 0,345. Это значит, что уровень спектров при переходе от «мягких» к «твердым» грунтам изменяется (уменьшается) в среднем в 1,75-2,21 раза, что хорошо согласуется с современными представлениями о характере таких соотношений. Наконец, указанные выше средние значения $\Delta I_{\text{сп}}$ практически совпадают с рекомендациями отечественных СНиП, по увеличению расчетной сейсмичности на один балл при переходе от грунтов I категории СНиП по сейсмическим свойствам к грунтам II

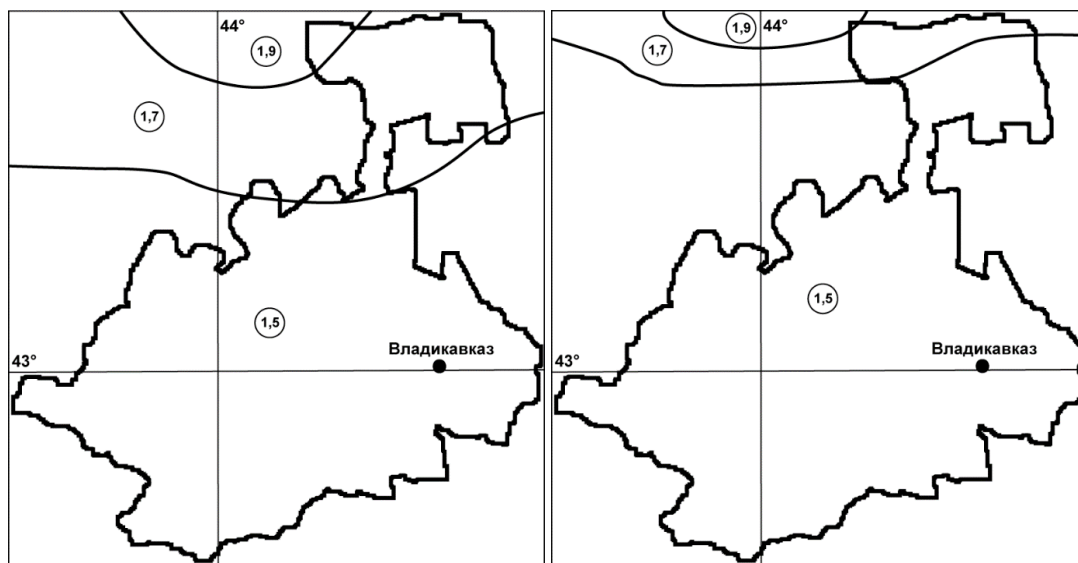


Рис. 6. Зонирование рассматриваемой территории по вероятным значениям $\Delta I_{\text{сп}}$ для среднего периода повторяемости сотрясений $t = 500$ лет с использованием функций затухания $|S|$ (M , D , f) по Варианту 3 (а) и по Варианту 4 (б). Толстая линия – граница РСО-Алания, тонкие линии – границы зон с разными значениями $\Delta I_{\text{сп}}$. Цифры в кружках – средние по зоне значения $\Delta I_{\text{сп}}$ в баллах MSK /

Fig. 6. Zoning of the considered territory according to the probable values of $\Delta I_{\text{сп}}$ for the average return period of ground motions $t = 500$ years using the attenuation functions $|S|$ (M , D , f) according to the Variant 3 (a) and according to the Variant 4 (b). The thick line denotes the boundaries of RNO-Alania, the thin lines – the boundaries of zones with different values of $\Delta I_{\text{сп}}$. The numbers in circles denote the average for the zone values of $\Delta I_{\text{сп}}$ in MSK intensity scale

категории. Таким образом, проведенные сопоставления свидетельствуют о том, что полученные в результате настоящего исследования оценки обладают определенным уровнем реалистичности и надежности.

Анализируя вышеизложенное, следует подчеркнуть, что сама по себе вариативность параметра $\Delta I_{\text{сп}}$ не является неожиданной. Она уже предопределена показанными в [Чернов, 2022] различиями в исходных функциях затухания спектров с расстоянием для «мягких» и «твердых» грунтов. Очевидно, что эти различия должны приводить к тому, что значения $\Delta I_{\text{сп}}$ могут изменяться из-за разного расположения расчетных точек по отношению к имеющейся в рассматриваемом районе системе зон ВОЗ и соответствующих разностей в абсолютных и относительных повторяемости потенциально опасных для этих расчетных точек землетрясений. Вышеописанные результаты полностью подтверждают сказанное. Таким образом, адекватные вероятностные оценки сейсмической реакции разных типов грунтов (и, соответственно, их разностей) должны строиться на основе взаимосвязанного учета как различий в сейсмических свойствах самих грунтов, так и в характеристиках всего включающего расчетную точку сейсмогенерирующего объема энергия-пространство – время. При этом заранее, (т.е. без проведения соответствующих расчетов) оценить, например, величину и площадную конфигурацию таких вариаций, представляется проблематичным из-за уникальности сочетаний факторов (M , D , f и t) определяющих итоговые значения $\Delta I_{\text{сп}}$ в каждой расчетной точке.

В связи с этим возникает вопрос о возможности получения (без существенной потери точности) таких (т.е. с учетом местных грунтовых условий) вероятностных оценок сейсмической опасности на основе стандартных рекомендаций

большинства российских нормативно-методических документов. Действительно, в отечественной инженерно-сейсмологической практике пока доминирует подход, согласно которому интегральные оценки сейсмической опасности, учитывающие объективно существующие различия в локальных грунтово-геоморфологических условиях, принципиально разделены на два этапа (мы называем эту систему оценок «двухступенчатой»). Здесь полный анализ сейсмической опасности (PSHA), учитывающий характеристики сейсмогенерирующего объема энергия-пространство – время, производится только для некоторого, в известной степени абстрактного, (т.к. его присутствие в расчетной точке не обязательно), типа грунта. Иногда такие грунты еще называют «эталонными». В российской практике за «эталонные» обычно принимают так называемые «средние» грунты, соответствующие грунтам II категории СНиП по сейсмическим свойствам. В последнее время, кстати, в нашей стране вслед за западными тенденциями появляются предложения использовать в качестве «эталонных» скальные грунты. Не обсуждая здесь высказываемые при этом резоны таких замен, заметим лишь, что, в контексте поставленных перед нашим исследованием задач, эти замены дела не меняют. В любом случае, упомянутые выше процедуры (т.е. оценки воздействий для «эталонного» грунта) составляют содержание и осуществляются в рамках вышеозначенного первого этапа. В отечественной практике они реализуются исследованиями типа общего (ОСР) и детального (ДСР) сейсмического районирования, а также осуществляемого в рамках сейсмического микрорайонирования (СМР) уточнения исходной сейсмичности (УИС). Переход же от оценок для «эталонных» грунтов к оценкам для «реальных» грунтов, т.е. грунтов, наличествующих в данной расчетной точке, осуществляется в рамках второго этапа, путем введения в сформированный на первом этапе результат, тех или иных «грунтовых» поправок. Особенностью этих поправок в свете рассматриваемых здесь вопросов, является их независимость от результатов PSHA первого этапа и, главное то, что они имеют другой физический смысл. Так, если результат PSHA есть суперпозиция воздействий от разных сейсмических событий с учетом фактора *неопределенности* их возникновения, то «грунтовые» поправки таковыми не являются т.к. дают оценку (пусть даже вероятностную) для некоего *достоверного* события.

Таким образом, продемонстрированная настоящим исследованием органическая связь «грунтовых» поправок с особенностями зон ВОЗ и сейсмического режима в окружающем расчетную точку сейсмогеологическом пространстве «двухступенчатыми» схемами практически игнорируется. Это, как показывают, например, рисунки 3-5, может приводить к существенным погрешностям в итоговых оценках уровня сейсмической опасности в данном месте, что является органическим недостатком таких «двухступенчатых» решений.

Указанные несоответствия показывают, что при более корректной постановке вопроса «грунтовая» поправка должна вводиться в соответствующие модели сильных движений грунта еще на первом этапе, до интегрирования воздействий от отдельных потенциально опасных очагов землетрясений, а не после их интегрирования, что происходит, когда в вероятностные результаты ОСР, ДСР или УИС затем вводятся те или иные «грунтовые» поправки. Такие оценки мы называем «однотупенчатыми». В то же время просто переход к «однотупенчатыми» расчетным схемам является условием необходимым, но недостаточным. Достаточным он может стать в том случае, если, так же, как и базовые «региональные» или «фоновые» оценки, «грунтовые» поправки, будут учитывать их зависимость, в том числе, и

от тех характеристик, от которых зависят выполняемые для «эталонных» грунтов базовые оценки. В настоящем исследовании, например, такими характеристиками являются M , D , f и t .

Выводы

Результаты настоящих исследований свидетельствуют о том, что учет выявленного на предыдущих этапах более сложного, чем обычно принимается в стандартных оценках характера изменения с расстоянием спектров «мягких» и «твердых» грунтов может приводить к значительным корректировкам итоговых вероятностных оценок сейсмической опасности. Корректировки эти имеют индивидуальный характер, т. к. зависят не только свойств самих грунтов, но и от характеристик всего сейсмогенерирующего пространства (включая параметры сейсмического режима), в пределах которого имеет распространение данный тип грунта. Причем характер этих зависимостей различен для разных типов грунта. Данное исследование проведено на примере территории РСО-Алания, со своими сейсмогеологическими условиями, вообще говоря, отличными от других сейсмоактивных районов. Поэтому для составления более полных представлений о рассматриваемом вопросе, как таковом, полезно провести подобные оценки и для других территорий, с другими сейсмогеологическими условиями. Кроме того, учитывая, что в данной работе среди многих важных для инженерно-сейсмологической практики характеристик сейсмических воздействий, пока рассмотрены только макросейсмические интенсивности сотрясений, в дальнейшем нужно подобным образом рассмотреть также вопрос и относительно других параметров СДГ. Эти и некоторые другие аспекты, касающиеся данной тематики, планируется рассмотреть в дальнейшем.

На основании вышеизложенного могут быть сделаны следующие **выводы**:

1. Вероятностные оценки возможных сейсмических воздействий с учетом местных грунтовых условий, выполняемые на основе распространенных в РФ «двухступенчатых» расчетных схем (где сначала дается «фоновая» интегральная вероятностная оценка, в которую затем вводится «грунтовая» поправка), не являются корректными и могут содержать погрешности, имеющие существенное практическое значение.

2. Более перспективными в данном отношении являются «одноступенчатые» схемы расчетов, когда реакции разных типов грунтов учитываются уже на первом этапе (т. е. до получения интегральных оценок) путем разработки соответствующих моделей СДГ.

3. Поскольку в данной работе рассмотрены частные случаи оценок только макросейсмических интенсивностей сотрясений и только для сейсмогеологических условий территории РСО-Алания, в дальнейшем, для выявления более общей картины, под тем же углом следует рассмотреть и другие параметры сейсмических воздействий (амплитуды, спектры, акселерограммы и др.), а также оценки сейсмической опасности в других сейсмоактивных районах.

Литература

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. Т. 1-2. – М.: Мир, 1983. – 520 с.
2. Алешин А. С. Континуальная теория сейсмического микрорайонирования. – М.: Научный мир, 2017. – 300 с.

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., Макиев В.Д. Макросейсмическое проявление сейсмических событий, обусловленное влиянием грунтовых условий и формирование карт сейсмического микрорайонирования. // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – № 1. С. 48-55. DOI 10.23671/VNC.2018.1.11247
5. Заалишвили В.Б. Мельков Д.А., Никонова Н.В., Смирнова Л.Н., Уздин А.М. Характеристики пространственной неоднородности поля ускорений дневной поверхности // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12 (1). – С. 75-88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006
6. Калинина А.В., Аммосов С.М., Быкова В.В., Татевосян Р.Э. О применимости стандартного спектра реакции для оценки ожидаемых сейсмических воздействий. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2017. – Т. 44. № 2. – С. 67-73. DOI: 10/21455/VIS2017/ 2-4.
7. Кригер Н.И., Кожевников А.Д., Миндель И.Г. Сейсмические свойства дисперсных пород (сейсмозоологический подход). – М.: ИНЖЕКО, 1994. – 195 с.
8. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. – М.: Госстройиздат, 1962. – 284 с.
9. Напетваридзе Ш. Г. Некоторые задачи инженерной сейсмологии. – Тбилиси: Мицни-ерба, 1973. – 162 с.
10. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность. Методическое руководство. / Отв. Ред. О. В. Павлов; Институт земной коры. – М.: Наука, 1988. – 244 с.
11. Ратникова Л.И. Сакс М.В. Кронрод Т.Л. К вопросу о пересчете акселерограмм сильных движений на различные грунтовые условия. // Исследования по сейсмической опасности. – М.: Наука. 1988. – С. 81-93.
12. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избран. труды. – М.: Наука, 1985. – 408 с.
13. Саваренский Е. Ф. Сейсмические волны. – М.: Наука, 1972. – 293 с.
14. Сейсмический риск и инженерные решения. / Под ред. Ц. Ломнитца и Э. Розенблюта. – М.: Недра, 1981-375 с.
15. Сейсмическое микрорайонирование. / Под ред. С.В. Медведева. – М.: Наука, 1977. – 248 с.
16. Чернов Ю.К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территории. – Ташкент: Фан, 1989. – 295 с.
17. Чернов Ю.К. Опыт детальных вероятностных оценок возможных сейсмических воздействий на территории РСО-Алания. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11 (2). – С. 87-102. DOI: 10.46698/VNC.2021.83.10.007
18. Чернов Ю.К. Некоторые предварительные данные о спектрах колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях разных магнитуд и удаленностей. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12 (3). – С. 61-76. DOI: 10.46698/VNC.2022.45.59.004
19. Чернов Ю.К., Заалишвили В.Б., Дзеранов Б.В. Модели сейсмичности для вероятностного детального сейсмического районирования территории РСО-Алания. // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – № 4. – С. 162-178. DOI:10.23671/VNC.2018.4.20158
20. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Аптикаев Ф.Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий. // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 34. – М.: Наука. 1993. – С. 5-94.
21. Штейнберг В.В. О поведении рыхлых грунтов при сильных землетрясениях. // ДАН СССР. – 1984. – Т. 275. № 2. – С. 350-354.
22. Akkar S., Sandikkaya M.A., Bommer J.J. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. // Bull. Earthq. Eng. – 2014. – Vol. 12 (1). – pp 359-387. DOI: 10.1007/s10518-013-9461-4
23. Atkinson G.M. and D.M. Boore. Modifications to existing ground-motion prediction equations in light of new data. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2011. – Vol. 101 (3). – pp. 1121-1135.
24. Beven K.J., Aspinall W.P., Bates P.D., Borgomeo E., Goda K., Hall J.W., Page T., Phillips J.S., Rougier J.T., Simpson M., Stephenson D.B., Smith P.J., Wagener T.,

Watson M. Epistemic uncertainties and natural hazard risk assessment. Part 1. // A review of the issues. Nat. Hazards Earth. Syst. Sci. Discuss. – 2015. – No. 3. – pp. 7333-7377. DOI: 10.5194/nhessd-3-7333-2015.

25. Bora S. S., Cotton F., Scherbaum F. NGA-West² empirical fourier and duration models to generate adjustable response spectra. // Earthquake Spectra. – 2019. – Vol. 55 (1). – pp. 61-93.

26. Campbell K. W., Bozorgnia Y. NGA West² ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. // Earthquake Spectra. – 2014. – Vol. 30 (3). – pp. 1087-1115. DOI: 10.1193/062913EQS175M.

27. Sokolov V., Sahran H. M. Generation of stochastic earthquake ground motion in western Saudi Arabia as f first step development of regional ground motion prediction model. // Arabian Journal of Geosciences. – 2018. – p. 11638. DOI: 10.1007/s12517-018-3394-9

References

1. Aki K., Richards P. Quantitative seismology. Theory and methods. Vol. 1-2. Moscow. Mir. 1983. 520 p. (In Russ.)

2. Aleshin A. S. Continuum theory of seismic microzonation. Moscow. Nauchnyy Mir. 2017. 300 p. (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., Makiev V. D. Macroseismic evidence of seismic events caused by influence of ground conditions and formation of maps of seismic microzonation. Geology and geophysics of Russian South. 2018. No. 1. pp. 48-55. (In Russ.) DOI 10.23671/VNC.2018.1.11247.

5. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Nikonova N. V., Smirnova L. N., Uzdin A. M. Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field on the day surface. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 75-88. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006.

6. Kalinina A. V., Ammosov S. M., Bykova V. V., Tatevosyan R. E. On the applicability of the standard response spectrum for assessing expected seismic impacts. Voprosy Inzhenernoi Seismologii. 2017. Vol. 44. No. 2. pp. 67-73. (in Russ.) DOI: 10/21455/VIS2017/2-4.

7. Kriger N. I., Kozhevnikov A. D., Mindel I. G. Seismic properties of dispersed rocks (seismoecological approach). Moscow. INGEKO. 1994. 195 p. (in Russ.)

8. Medvedev S. V. Engineering seismology. Moscow. Gosstroyizdat. 1962. 284 p. (in Russ.)

9. Napetvaridze Sh. G. Some tasks of engineering seismology. Tbilisi, Mitsnierba. 1973. 162 p. (in Russ.)

10. Pavlov O. V. (ed.) Assessment of the influence of soil conditions on seismic hazard. Methodological guide. Institute of the Earth's Crust. Moscow. Nauka. 1988. 244 p. (in Russ.)

11. Ratnikova L. I. Saks M. V. Kronrod T. L. To the question of recalculation of accelerograms of strong motions for different ground conditions. Studies on seismic hazard. Moscow. Nauka. 1988. pp. 81-93. (in Russ.)

12. Riznichenko Yu. V. Problems of seismology. Elected works. Moscow. Nauka. 1985. 408 p. (in Russ.)

13. Savarensky E. F. Seismic waves. Moscow. Nauka. 1972. 293 p. (in Russ.)

14. Lomnitz C., Rosenbluth E. (eds.) Seismic risk and engineering solutions. Moscow. Nedra. 1981. 375 p. (in Russ.)

15. Medvedev S. V. (ed.) Seismic microzonation. Moscow. Nauka. 1977. 248 p. (in Russ.)

16. Chernov Yu. K. Strong ground motions and quantitative assessment of the seismic hazard of the territory. Tashkent, Fan. 1989. 295 p. (in Russ.)

17. Chernov Yu. K. The experience of detailed probabilistic assessments of possible seismic effects on the territory of North Ossetia-Alania. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 87-102. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.83.10.007.

18. Chernov Yu. K. Some preliminary data on the vibration spectra of “soft” and “hard” soils during earthquakes of different magnitudes and distances. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 3. pp. 61-78. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.45.59.004.
19. Chernov Yu. K., Zaalishvili V. B., Dzeranov B. V. Seismicity patterns for a detailed probabilistic seismic zoning of the North Ossetia-Alania territory. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2018. No. 4. pp. 162-178. (in Russ.) DOI: 10.23671/VNC.2018.4.20158.
20. Shteinberg V. V., Saks M. V., Aptikaev F. F. et al. Methods for assessing seismic impacts. *Voprosy Inzhenernoi Seismologii*. Issue. 34. Moscow. Nauka. 1993. pp. 5-94. (in Russ.)
21. Steinberg V. V. On the behavior of loose soils during strong earthquakes. *Doklady AS USSR*. 1984. Vol. 275. No. 2. pp. 350-354. (in Russ.)
22. Akkar S., Sandikkaya M. A., Bommer J. J. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bull. Earthq. Eng.* 2014. Vol. 12. pp 359-387. DOI: 10.1007/s10518-013-9461-4.
23. Atkinson G. M. and D. M. Boore. Modifications to existing ground-motion prediction equations in light of new data. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2011. Vol. 101. pp. 1121-1135.
24. Beven K. J., Aspinall W. P., Bates P. D., Borgomeo E., Goda K., et al. Epistemic uncertainties and natural hazard risk assessment. Part 1. A review of the issues. *Nat. Hazards Earth. Syst. Sci. Discuss.* 2015. No. 3. pp. 7333-7377. DOI: 10.5194/nhessd-3-7333-2015.
25. Bora S. S., Cotton F., Scherbaum F. NGA-West² empirical fourier and duration models to generate adjustable response spectra. *Earthquake Spectra*. 2019. Vol. 55. pp. 61-93.
26. Campbell K. W., Bozorgnia Y. NGA West² ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. *Earthquake Spectra*. 2014. Vol. 30. pp. 1087-1115. DOI: 10.1193/062913EQS175M.
27. Sokolov V., Sahran H. M. Generation of stochastic earthquake ground motion in western Saudi Arabia as f first step development of regional ground motion prediction model. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018. p. 11638. DOI: 10.1007/s12517-018-3394-9

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

УДК 553.982

DOI: [10.46698/VNC.2022.46.87.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.46.87.008)

Оригинальная статья

Моделирование сети трещин в объеме природных резервуаров нефтекумских отложений Зимне-Ставкинско-Правобережного месторождения на основе промыслово-линеamentного метода в программном обеспечении Petrel

К. М. Саидова¹, О. О. Луценко², К. И. Черненко², Т. И. Рыжевский²¹ АО «СевКавНИПИгаз», Россия, 355035, г. Ставрополь, ул. Ленина 419;²Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355009, г. Ставрополь, пр-т Кулакова 16/1, корп. 16, kchernenko@ncfu.ru

Статья поступила: 02.11.2022, доработана: 06.12.2022, одобрена к публикации: 09.12.2022

Резюме: Актуальность работы. Для повышения эффективности разработки месторождений полезных ископаемых и проектирования геолого-технологических мероприятий (ГТМ) на основе доступных данных целесообразно использование цифровых геологических моделей, учитывающих особенности различных коллекторов. Объектом исследования являются залежи, приуроченные к нефтекумским карбонатным отложениям нижнего триаса Зимне-Ставкинско-Правобережного газонефтяного месторождения (ЗСПМ), находящегося на завершающей стадии разработки. Эти залежи характеризуются сложным геологическим строением, осложняющим разработку и приводящим к крайне неравномерным накопленным отборам нефти при равномерном распределении добывающих скважин. С целью эффективного и наиболее оптимального извлечения остаточных запасов в условиях нерентабельности применения дорогостоящих средств доразведки необходимо создание моделей залежей с применением новых подходов моделирования зон повышенной продуктивности с учетом геодинамической характеристики территории. **Целью исследования** является разработка методологического подхода построения реалистичной цифровой геологической модели трещиноватых карбонатных коллекторов по данным дистанционного зондирования Земли и продуктивности эксплуатационных скважин на примере залежей ЗСПМ. **Методы исследования.** При проведении исследования был использован комплексный подход, включающий анализ, систематизацию и обобщение геолого-промысловых данных, применение системно-аэрокосмического (линеamentного) метода, алгоритма дискретного моделирования распределения трещин объектов (Discrete Fracture Network), реализованного в программном обеспечении (ПО) Petrel. **Результаты работы.** Продемонстрирован способ обоснования распределения трещиноватости в карбонатных породах при отсутствии большого объема специальных исследований при помощи совмещения данных по накопленным отборам и структурным нарушениям пласта. Данный подход апробирован на цифровой модели залежей ЗСПМ. Геологическая модель сложного трещиноватого коллектора может стать важным инструментом для специалистов при работе с трещиноватыми горными породами для принятия экономически важных решений по уплотняющему бурению скважин, хранению газа, гидроразрыву пласта или добычи полезных ископаемых. Благодаря быстрому развитию вычислительных мощностей и компьютерной графики цифровые геологические модели позволяют получить представление о воздействии трещиноватости в коллекторах на степень выработки запасов месторождений углеводородов.

Ключевые слова: карбонатный коллектор, моделирование трещиноватости, направления глубинных разломов, дешифрирование космоснимков, линеamentы, зоны повышенной продуктивности, модель

двойной пористости, трещинная пустотность, тренд плотности трещин, дискретная сеть трещин.

Для цитирования: Саидова К. М., Луценко О. О., Черненко К. И., Рыжевский Т. И. Моделирование сети трещин в объеме природных резервуаров нефтекумских отложений Зимне-Ставкинско-Правобережного месторождения на основе промыслово-линеamentного метода в программном обеспечении Petrel. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (4): 101-113. DOI: 10.46698/VNC.2022.46.87.008.

GEOPHYSICAL METHODS

DOI: [10.46698/VNC.2022.46.87.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.46.87.008)

Original paper

Modeling of network of fractures in the volume of natural reservoirs of Neftekumsk deposits of Zimne-Stavkinsko-Pravoberezhnoye field based on field-lineament method in Petrel software

K. M. Saidova¹, O. O. Lutsenko², K. I. Chernenko², T. I. Ryzhevskiy²

¹JSC "SevKavNIPGaz", 419 Leninastreet, Stavropol 355035, Russian Federation;

²North-Caucasus Federal University, 16/1 Kulakova Avenue, Stavropol 355009, Russian Federation, e-mail: kchernenko@ncfu.ru

Received: 02.11.2022, revised: 06.12.2022, accepted: 09.12.2022

Abstract: Relevance. To increase the efficiency of the development of mineral deposits and the design of geological and technological measures (GTM) based on available data, it is advisable to use digital geological models that take into account the characteristics of various reservoirs. The object of study is the deposits confined to the Neftekumsk carbonate deposits of the Lower Triassic of the Zimne-Stavkinsko-Pravoberezhnoye gas-oil field, which is at the final stage of development. These deposits are characterized by a complex geological structure, which complicates development and leads to extremely uneven cumulative oil recovery with a equal distribution of production wells. In order to extract residual reserves efficiently and most optimally in the context of the unprofitability of using expensive additional exploration tools, it is necessary to create models of deposits using new approaches to modeling zones of increased productivity, taking into account the geodynamic characteristics of the territory. **The aim of the study** is to develop a methodological approach to building a realistic digital geological model of fractured carbonate reservoirs based on Earth remote sensing data and the productivity of production wells using the example of these deposits. **Methods.** During the study, an integrated approach was used, including analysis, systematization and generalization of geological and field data, a system-aerospace (lineament) method, an algorithm for discrete modeling of the distribution of fractures as objects (Discrete Fracture Network), implemented in Petrel software. **Results.** A method has been demonstrated to justify the distribution of fractures in carbonate rocks in the absence of a large amount of special studies by combining data on accumulated production and structural breakdowns of the reservoir. This approach has been tested on a digital model of these deposits. A geological model of a complex fractured reservoir can be an important tool for professionals working with fractured rock formations to make economically important decisions for infill drilling, gas storage, hydraulic fracturing or mining. Due to the rapid development of computing power and computer graphics, digital geological models provide insight into the impact of fractured reservoirs on the depletion of hydrocarbon reserves.

Keywords: carbonate reservoir, fracture modeling, deep fault directions, interpretation of space images, lineaments, zones of increased productivity, dual porosity model, fractured porosity, fracture density trend, discrete fracture network.

For citation: Saidova K. M., Lutsenko O. O., Chernenko K. I., Ryzhevskiy T. I. Modeling of network of fractures in the volume of natural reservoirs of Nefttekumsk deposits of Zimne-Stavkinsko-Pravoberezhnoye field based on field-lineament method in Petrel software. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (4): 101-113. DOI: 10.46698/VNC.2022.46.87.008.

Введение

Актуальность работы. В современный период построение цифровых моделей залежей углеводородов является обязательной задачей в процессе их разведки и разработки. Для гранулярных (пористых) коллекторов обычно не возникает серьезных проблем, методология моделирования известна и широко используется. Для месторождений с трещинным (в частности, с карбонатным) коллектором моделирование зачастую проводится по аналогии с гранулярным коллектором, что приводит к существенным погрешностям как к распределению пустотного пространства в объеме залежи, так и к неточностям в подсчете геологических и извлекаемых запасов. Активно развиваются методы моделирования трещинных систем как среды с двойной пористостью. Построение модели с учетом трещиноватости позволяет уточнить гидродинамическую модель и более корректно прогнозировать разработку залежей углеводородов.

Трещиноватость пород – один из источников проблем при математическом моделировании в связи со специфичностью фильтрации флюидов в данной среде.

Процесс геологического моделирования затрудняется сложностью распределения и взаимодействия типов поровых пространств, быстротой и непредсказуемостью изменений фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) по вертикали и латерали, нелинейностью связи пористости (пустотности) и проницаемости.

Авторами предложен подход к моделированию трещинного карбонатного коллектора рифогенного генезиса с учетом геодинамических особенностей территории и данных по продуктивности эксплуатационных скважин. Объектом моделирования является нефтекумский природный резервуар Зимне-Ставкинско-Правобережного газонефтяного месторождения, расположенного в Восточном Предкавказье рядом с поселком Зимняя Ставка. Нефтеносная толща нижнетриасовых отложений залегает на глубине до 4 км.

Породами-коллекторами нефтекумской свиты являются трещиноватые и неравномерно кавернозные известняки и доломиты, подвергшиеся интенсивным вторичным изменениям: трещиноватости, выщелачиванию, доломитизации, вторичной кальцитизации и окремнению. Толщина свиты 400-560 м.

Разнонаправленные трещинные системы коллектора – горизонтальная, вертикальная и диагональная – обуславливают его фильтрационную способность. Густота распределения трещин варьируется от 80 м^{-1} до 800 м^{-1} , раскрытость – 0,01-1,5 мм. Зачастую трещины заполняет кальцит или глинистый материал. Каверны распределены неравномерно, сообщаются с трещинами и друг с другом посредством интенсивной трещиноватости.

Качество ФЕС коллекторов продуктивного пласта нефтекумской свиты согласно классификации А. А. Ханина, является средним и пониженным. Матричная проницаемость очень низкая – менее $0,001 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$. Гидродинамические исследования показали, что проницаемость карбонатных пород находится в пределах $13 \cdot 10^{-3}$ – $158 \cdot 10^{-3}$, со средним значением $68 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$ [Neleпов et al., 2021]. Исследования проницаемости, зависимой от трещинной пористости (назовем ее пустотно-

стью), для карбонатных пород по керну не проводились. В качестве нижнего предела проницаемости нефтекумской свиты принято значение 1×10^{-3} мкм².

Материалы и методы исследований

Для решения поставленной задачи, использовались региональные исследования и данные бурения района ЗСПМ, данные о нефтяных залежах, в том числе накопленная добыча изучаемых объектов, космоснимки территории с выявленными линеamentами, а также научные публикации и методическая литература по изучаемой теме [Голованов и др., 1987; Корчуганова и др., 2009; Милосердова, 2022].

При моделировании трещинные карбонатные коллекторы могут представляться средой с двойной пористостью. В исследовании [Zhang et al., 2021] была предложена континуальная (непрерывная) схема с учетом анизотропной трещиноватой структуры и низкопроницаемой матричной пористости.

В исследовании [Panza et al., 2019] установлена незначительность влияния на пористость и проницаемость коллектора микротрещиноватости (располагающейся перпендикулярно слоистости пород) по сравнению с матричной пористостью. В связи с этим при моделировании трещиноватости пласта можно пренебречь микротрещинами, так как существенного влияния на циркуляцию флюида они не оказывают. Мезомасштабная трещинная пустотность и связность рассчитываются с использованием детерминированной сети Discrete Fracture Network (DFN).

Один из подходов к моделированию сложных карбонатных коллекторов рассматривается в статье [Yan et al., 2022], где предлагается отдельно моделирование кавернозного и трещиноватого поровых пространств. Также предлагаются разные подходы к моделированию трещин в зависимости от их масштаба: стохастический (мелкие трещины) и детерминированный подход, требующий данных сейсмических исследований и скрининг (крупные трещины).

Построение дискретных моделей трещиноватости пород и дальнейшего перемасштабирования их в свойства, пригодные для гидродинамического моделирования, требует больших мощностей используемых ЭВМ и большого количества времени, в связи с чем авторами исследования [He et al., 2021] был рассмотрен метод, использующий нейронные сети. В основе метода лежит глубинное обучение, заключающееся в создании образцов моделей для обучения, расчетах и анализе ошибок, после чего осуществляется обновление образцов. Процесс повторяется до достижения моделью точности при расчетах свыше 90%. Подобный подход требует специального ПО, оснащенного модулями и обученными специалистами, что не всегда возможно при моделировании геологических объектов.

В исследованиях, проведенных под руководством [Hennings et al., 2012], использованы специальные методы ГИС, такие как микроимиджеры (MicroImager [FMI]), предоставляющие параметры трещиноватости. В исследовании установлено, что разломы и примыкающие к ним зоны подвергаются воздействию локальных напряжений, что способствует увеличению проницаемости и миграции углеводородов.

Специальные методы ГИС с применением микроимиджеров трудоемки, и, хотя позволяют получить ценные точечные данные о параметрах трещиноватости пород, но все же, не дают возможности достоверно охарактеризовать закономерности строения месторождения. Использование в процессе исследований 3D-сейсморазведки, микроимиджеров и других технологий, характерных для классического подхода, финансово затратно и нецелесообразно для объектов старых нефтегазодобываю-

щих регионов [Данилова и др., 2022; Орехов, Аamani Мангуа, 2019; Симоненко и др., 2018].

Близким по подходу авторов настоящей статьи к выявлению косвенных параметров зон трещиноватости является подход, применяемый в исследовании Л. В. Милосердовой с единомышленниками [Miloserdova et al., 2021], в котором установлена связь нефтегазоносности и дизъюнктивных тектонических нарушений Прикаспийской синеклизы. Нарушения фиксируются в виде линеаментов на космических снимках, расшифровка которых осуществлялась традиционными методами. Примечательно, что узлы пересечения линеаментов отражают участки с повышенной проницаемостью пород, к которым приурочены наиболее крупные месторождения углеводородов. Данное исследование является примером сопоставления данных дешифрирования снимков Земли и геофизических данных для моделирования сложных коллекторов. Основная задача данного метода – применение всей доступной информации для выявления зон повышенной трещиноватости и, соответственно, повышенной продуктивности коллекторов.

Для моделирования трещиноватости пласта на сегодняшний день используются два основных подхода: непрерывный (континуальный) и дискретный.

Continuous Fracture Modelling (CFM) – непрерывное моделирование, в основе которого лежит распространение скалярных величин интенсивности распределения трещин в моделируемом пласте [Jenkins et al., 2009]. Однако при использовании данного метода невозможно учесть неопределенности, связанные с геометрией и направлением трещин.

Discrete Fracture Modelling (DFM) – дискретное моделирование, основанное на представлении трещин как отдельных физических объектов с собственными механическими и петрофизическими свойствами, позволяющее в некоторой степени учитывать индивидуальные характеристики трещин (длина, апертура (раскрытость), направление, распределение) [Lavoine et al., 2020].

Для получения петрофизических свойств на основе сети трещин применяется процесс Upscaling (перемасштабирование), генерирующий трещинную пустотность, тензоры проницаемости и сигма-фактор, которые могут быть использованы при построении гидродинамической модели.

Качественное построение модели трещиноватой среды требует большого объема исследований геометрии и физических свойств трещин пласта [Черницкий, 2002].

При моделировании наибольшая неопределенность свойственна геометрическим параметрам трещин – длине и апертуре (раскрытости), так как их анализ требует привлечения дополнительных исследований (данные по геометрии трещин, а также их интенсивности получают с помощью сейсморазведки 3D, электрического микросканирования (показания микроимиджеров) и керна) [Гарифуллин и др., 2018; Абдуллин и др., 2018]. Крупные и новые месторождения подвергаются таким исследованиям, однако для малых месторождений и находящихся на завершающей стадии разработки, эти исследования считаются экономически нецелесообразными.

Результаты работы и их обсуждение

Рассматриваемый регион подвергается воздействию напряжений в двух направлениях: со стороны Главного Кавказского хребта Альпийско-Кавказской складчатой системы и, перпендикулярно ему, со стороны Ставропольского свода, вследствие

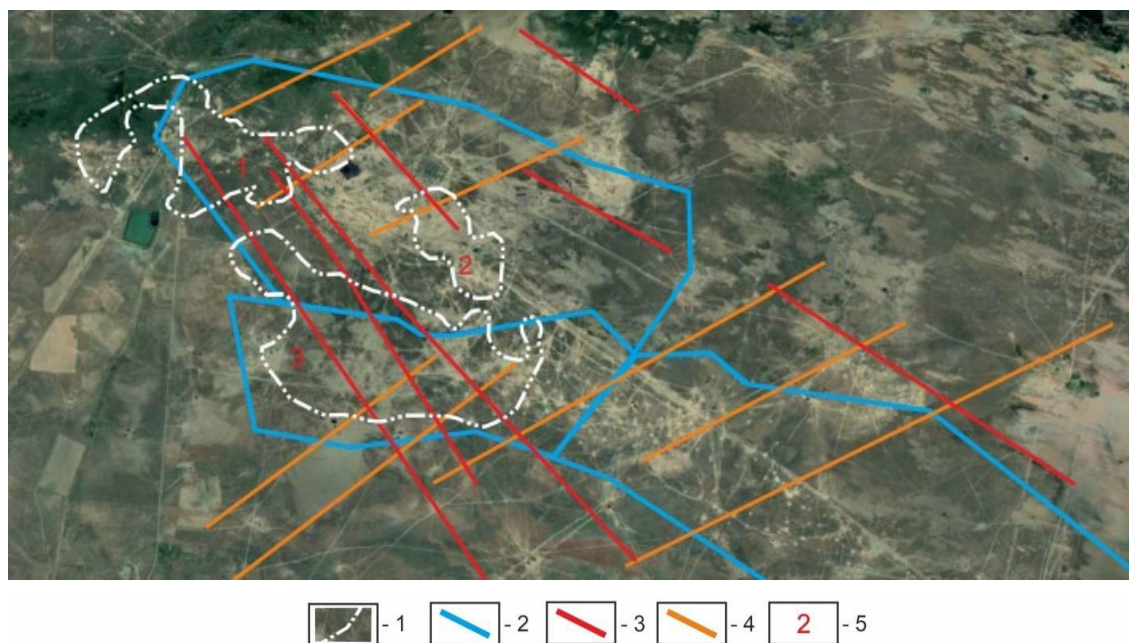


Рис. 1. Основные направления линеаментов ЗСПМ.

Условные обозначения: 1 – границы залежей; 2 – границы лицензионных участков; 3 – линеаменты основного направления; 4 – линеаменты дополнительного направления; 5 – залежи: Правобережная (1); Зимняя Ставка (2); Пушкарская (3) /

Fig. 1. The main directions of the lineaments of the Zimne-Stavkinsko-Pravoberezhnoye field.

Legends: 1 – deposit boundaries; 2 – license area boundaries; 3 – lineaments of the main direction; 4 – lineaments of the additional direction; 5 – deposits: Pravoberezhnaya (1); Zimnyaya Stavka (2); Pushkarskaya (3)

чего образована система боков фундамента [Neleпов et al., 2021]. Системы блоков разделяются разломами и некоторые из них дешифрируются на космоснимках в виде макро- и мезолинеаментов. Разломы выявлены ГИС-исследованиями и бурением разведочных скважин.

При рассмотрении рисунка более мелких линеаментов, выделенных в пределах ЗСПМ по результатам дешифрирования космических снимков рассматриваемой территории, прослеживается повторение двух направлений основного и дополнительного (рис. 1).

Основное направление линеаментов на площади месторождения – юго-восток – северо-западное, а трещиноватости в соответствии с проведенными исследованиями близко к основному направлению линеаментов и равно 43° . Дополнительное направление имеет юго-запад – северо-восточное направление и хорошо прослеживается в виде разрывных нарушений по сейсмическим данным.

При рассмотрении трещиноватости и тектоники пермо-триасовых отложений [Летавин и др., 1987; Черненко и др., 2022; Хасанов, 2011; Хасанов и др., 2020; Морозовский и др., 2014] выявлено существенное влияние на формирование и распределение скоплений углеводородов в нижнем триасе зоны трещиноватости, имеющей направление юго-восток – северо-запад, что соответствует улучшению ФЕС в восточном и северном направлениях.

Объектами исследования являются залежи в нефтекумской свите на территории Пушкарского поля, Зимней ставки и поля Правобережное рассматриваемого месторождения.

Анализ расположения линеаментов на территории месторождения и карт накопленных отборов позволяет выявить общность направлений структурных нарушений и направлений зон повышенной продуктивности [Черненко и др., 2022].

Данная закономерность обусловлена протекающими в земной коре геодинамическими процессами. Зоны, подвергшиеся растяжению при движении блоков фундамента, имеют высокую проницаемость, следствием чего при разработке залежей скважины, расположенные в этих зонах, отличаются повышенными дебитами.

Таким образом, распределение трещин в пласте обосновано с помощью связи между высокими накопленными отборами углеводородов и направленностью глубинных разломов и линеаментов дневной поверхности.

Построение модели двойной пористости осуществлялось в ПО Petrel процессом Fracture Network.

Для задания распределения трещиноватости в пласте в ПО Petrel использовался тренд плотности распределения трещин. В качестве основы для построения тренда применено произведение трех условных коэффициентов, присвоенных точкам расположения скважин: коэффициент относительной накопленной добычи скважин; коэффициент, учитывающий количество линеаментов/линий повышенной продуктивности, пересекающих скважины; коэффициент удаленности скважин от линеаментов/линий повышенной продуктивности.

Значения коэффициента относительной накопленной добычи скважин принимались в пределах каждой из трёх залежей – Пушкарской, Правобережной и Зимней Ставки. Наибольшая величина накопленного отбора нефти в скважине принята за 1, остальным скважинам в долевом соотношении были присвоены условные коэффициенты, количественно отражающие плотность накопленной добычи в разных участках пласта. Наибольшей плотности соответствует коэффициент 1, на удалении – 0,2.

Значения коэффициента, учитывающего количество линеаментов/линий повышенной продуктивности пересекающих скважины, задавались по следующему принципу: точкам, которые пересекает один линеамент, соответствует коэффициент равный 1, наибольшему количеству пересечений – четырем – соответствует значение коэффициента 1,75.

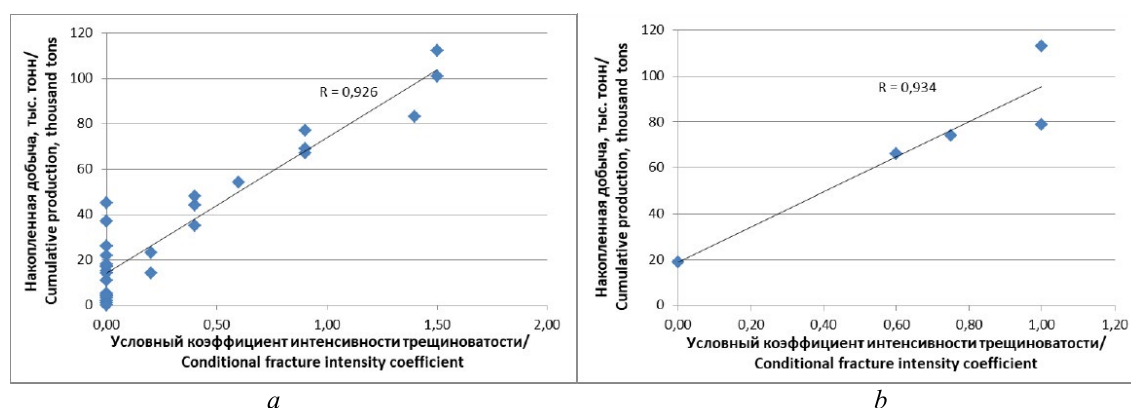


Рис. 2. График зависимости условного коэффициента от накопленной добычи Пушкарского (а) и Правобережного (б) полей ЗСПМ /

Fig. 2. Graph of dependence of the conditional coefficient on the cumulative production of Pushkarskoe (a) and Pravoberezhnoe (b) areas

Для задания значений коэффициента удаленности скважин от линеаментов/линий повышенной продуктивности, точкам, находящимся на расстоянии менее 100 м присвоен коэффициент равный единице, наименьший коэффициент – 0,01 – соответствует точкам на отдалении более 500 метров.

На рисунке 2 представлены графики зависимости итогового условного коэффициента интенсивности трещиноватости в пласте от накопленной добычи Пушкарского (А) и Правобережного (Б) полей ЗСПМ.

Коэффициент корреляции R по графикам превышает значение 0,9, что говорит о высокой степени корреляции исследуемых параметров.

Таким образом, на основании итогового коэффициента построена карта тренда, учитывающая несколько параметров, оказывающих потенциальное влияние на интенсивность распространения трещин в пласте (рис. 3).

Соответственно количеству залежей, плотность трещин построена в пределах трех полигонов – трех контуров нефтегазоносности залежей. «Очаги» трещиноватости в пределах одной залежи располагаются на расстоянии около 1500 метров. На построенной карте наблюдается согласованность направлений участков с повышенной трещиноватостью и линеаментами/линиями повышенной продуктивности.

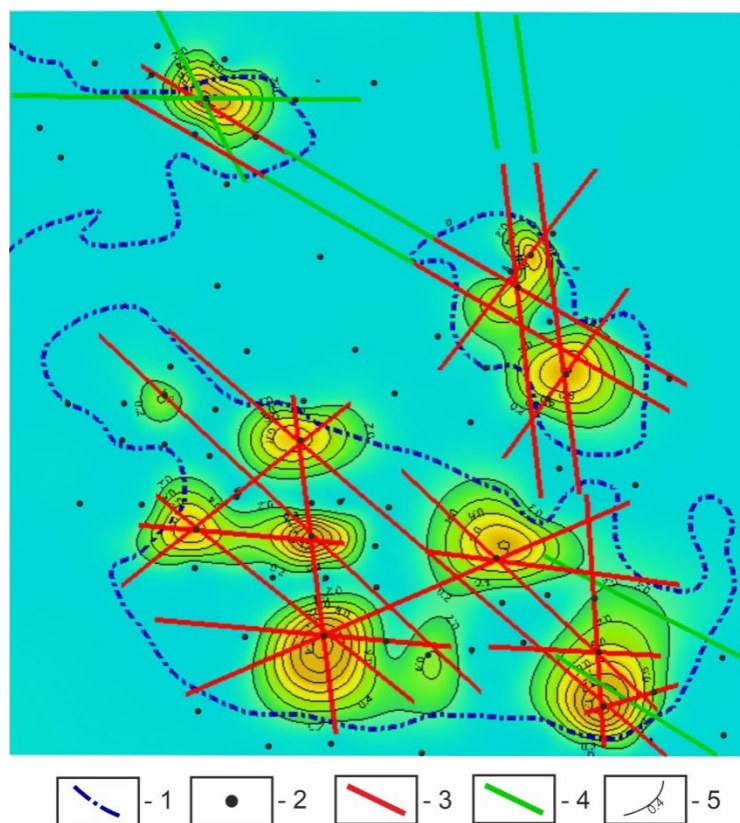


Рис. 3. Карта тренда плотности распределения трещиноватости Правобережной, Зимне-Ставкинской и Пушкарской залежей ЗСПМ.

Условные обозначения: 1 – контур залежи; 2 – место расположения скважины; 3 – достоверные линеаменты; 4 – предполагаемые линеаменты; 5 – изолинии интенсивности трещиноватости / Fig. 3. Map of the trend of fracture distribution density of Pravoberezhnaya, Zimne-Stavkinskaya and Pushkarskaya deposits.

Legends: 1 – deposit contour; 2 – well location; 3 – reliable lineaments; 4 – probable lineaments; 5 – isolines of fracture intensity

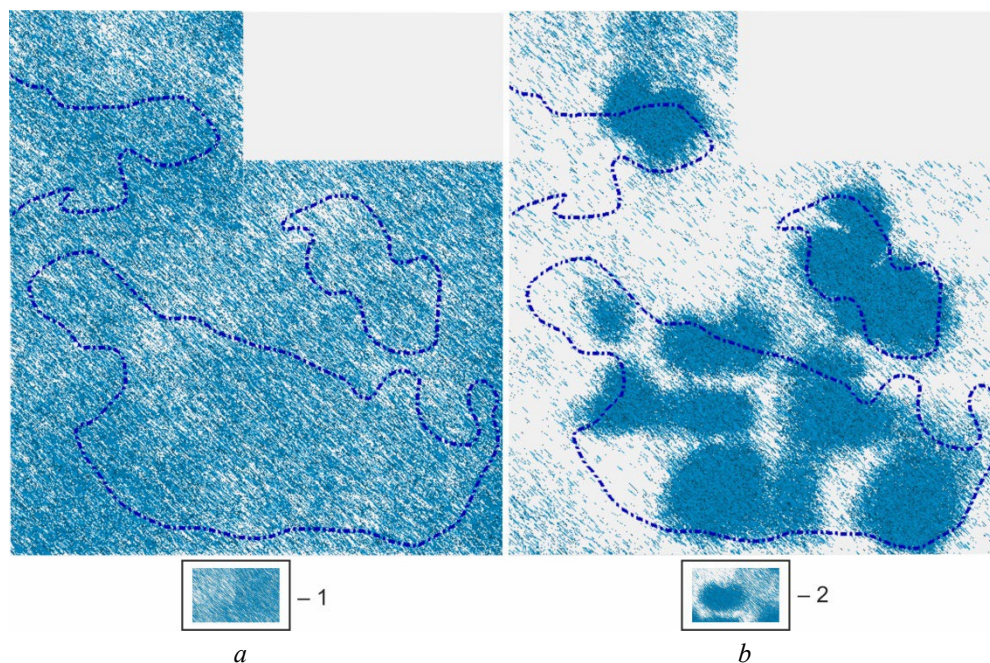


Рис. 4. Сеть трещин нефтекумской свиты нижнего триаса Правобережной, Зимне-Ставкинской и Пушкарской залежей ЗСПМ.

Условные обозначения: 1 – равномерное распределение трещин; 2 – распределение трещин с использованием тренда. /

Fig. 4. Network of fractures of the Lower Triassic Neftekumsk formation of Pravoberezhnaya, Zimne-Stavkinskaya and Pushkarskaya deposits.

Legends: 1 – equal distribution of fractures; 2 – distribution of fractures using a trend

Построение трещин производилось как в коллекторе, так и в неколлекторе пласта. Рассматриваемые отложения характеризуются и горизонтальной и вертикальной трещиноватостью, в связи с чем, соотношение длины горизонтальных трещин к вертикальным (elongation ratio) было принято 1:2.

Для построения модели принято нормальное распределение длин трещин. Максимальная длина единичных трещин принята в соответствии с допущением: ее максимальное значение приравнивается 1/10 от среднего межскважинного расстояния [Nelerov et al., 2021], для нефтекумской свиты эта величина составила 100 м.

Реализовано два варианта построения сети трещин: с равномерным распределением трещин (А) и с использованием карты тренда плотности трещин (Б) (рис. 4).

Сеть трещин подвергается перемасштабированию методом Oda. По завершению процесса получены куб трещинной пустотности (обычно с пустотностью менее 0,01 д. е.); тензоры проницаемости по трем направлениям (x; y; z); куб с сигма-фактором в каждой ячейке, характеризующий взаимодействие матричной пористости и трещин. На рисунке 5 показаны итоговые кубы трещинной пустотности пласта.

На рисунке А изображен куб пористости (термин, используемый в ПО Petrel), при построении которого использовалась сеть с равномерным распределением трещин (рис. 4А), то есть распределение плотности трещин построено случайным образом (с учетом иных заданных параметров). На рисунке Б представлен куб пористости пласта, при построении которого применялась сеть трещин, учитывающая тренд плотности распределения трещин в пласте (рис. 4Б), следовательно параметры этого свойства более обоснованы и пригодны для использования.

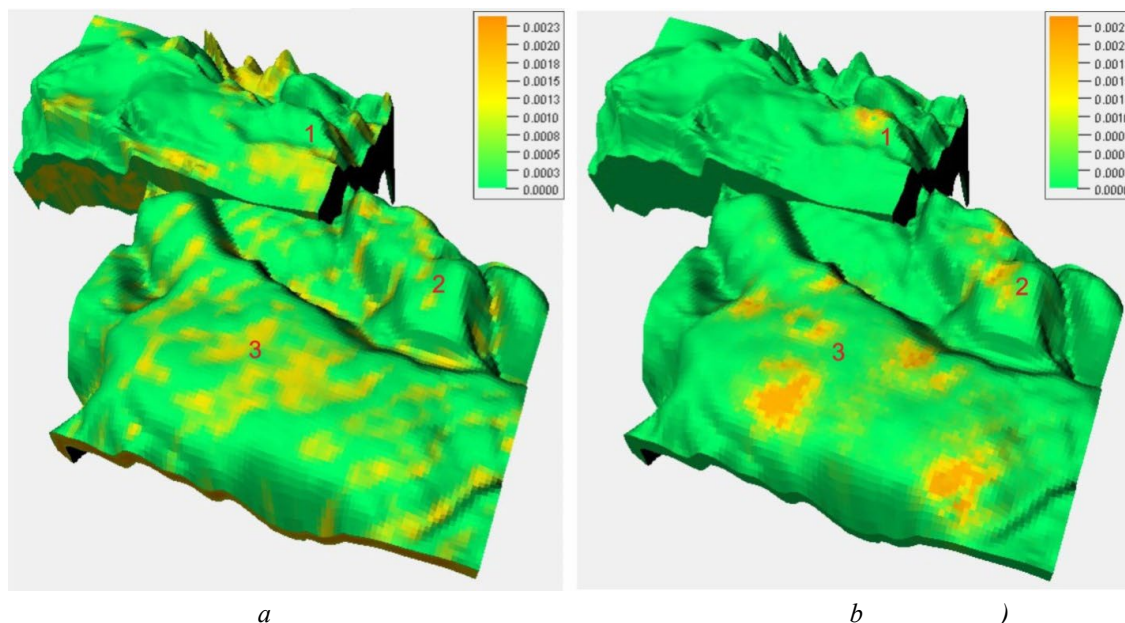


Рис. 5. Трещинная пустотность Правобережной (1), Зимне-Ставкинской (2) и Пушкарской (3) залежей ЗСПМ. а – равномерное распределение трещинной пустотности; б – распределение трещинной пустотности с использованием карты тренда. /

Fig. 5. Fractured porosity of Pravoberezhnaya (1), Zimne-Stavkinskaya (2) and Pushkarskaya (3) deposits. a – equal distribution of fractured porosity; b – fractured porosity distribution using a trend map

Выводы

В результате проведенного исследования сделаны следующие выводы:

1. Разрывные нарушения и сопровождающая их трещиноватость в пласте могут существенно влиять на продуктивность скважин. Выявление и учет участков их наибольшей интенсивности при доразведке и планировании ГТМ на территории месторождений может повысить эффективность разработки;
2. Существует корреляция между расположением скважин с высокими накопленными отборами и направленностью линеаментов/линий повышенной продуктивности Пушкарской, Правобережной и Зимне-Ставкинской залежей ЗСПМ;
3. Метод позволяет прогнозировать параметры трещиноватости и использовать их в дальнейшем при перемасштабировании моделей трещинной пустотности, проницаемости и сигма-фактора для гидродинамического моделирования в условиях ограниченности данных о трещиноватости.

Литература

1. Абдуллин Р. Н., Рахматуллина А. Р. Пример практического применения информации о трещиноватости по данным комплекса ГИС и высокотехнологических методов. // Георесурсы. – 2018. – № 3. – С. 261-266.
2. Гарифуллин Р. И., де Жуссино Г., Рувруа П. Моделирование трещиноватости, как важный этап проектирования разработки трещиноватых коллекторов. // Гоевразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии. Труды международной геолого-геофизической конференции. – М.: Издательство: ООО «ПолиПРЕСС», 2018. – С. 267-272.
3. Голованов М. П., Дроздов В. В. Опыт линеаментного анализа в Предкавказье // Космическая информация при поисках, разведке и эксплуатации газовых месторождений: результаты и перспективы использования. – М.: Труды ВНИИГАЗА, 1987. – С. 61-68.

4. Данилова Е. А., Дрягин В. В. Применение сейсмических и сейсмоакустических методов для выявления путей миграции углеводородов и повышения нефтеотдачи пластов в зонах тектонических нарушений Восточнобортной нефтегазоносной области Прикаспийской впадины. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12 (3). – С. 79-93. DOI: 10.46698/VNC.2022.12.99.005.
5. Корчуганова Н. И., Корсаков А. К. Дистанционные методы геологического картирования: учебник. – М.: КДУ, 2009. – 288 с.
6. Летагин А. И., Орел С. М., Чернышев С. М. и др. Тектоника и нефтегазоносность Северного Кавказа. – М.: Наука, 1987. – 94 с.
7. Милосердова Л. В. Аэрокосмические методы в нефтегазовой геологии: Учебник. / Под ред. П. В. Флоренского. – М.: ООО «Издательский дом Недра», 2022. – 502 с.
8. Морозовский Н. А., Кременецкий М. И., Сирота А. С. Локализация зон карбонатных коллекторов по результатам гидродинамических исследований скважин. // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 8. – С. 44-47.
9. Орехов А. Н., Агани Мангуа М. М. Возможности геофизических методов для прогнозирования трещиноватости коллекторов. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – № 6. – С. 198-209.
10. Симоненко Е. П., Долгирев С. С., Кириченко Ю. В. Возможности методов ГИС для изучения трещиноватости. // Георесурсы. – 2018. – № 3. – С. 267-273.
11. Хасанов М. А. Фильтрационно-емкостная модель пород коллекторов нижнего триаса Восточного Предкавказья. // КАРОТАЖНИК. – 2011. – № 4 (202). – С. 12-19.
12. 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
13. Черненко К. И., Еремина Н. В., Туманова Е. Ю. Линейные зоны повышенной продуктивности нефти в карбонатной залежи Пушкарского поля Зимне-Ставкинско-Правобережного месторождения. // Наука. Инновации. Технологии. – 2022. – № 3. – С. 29-46. DOI: 10.37493/2308-4758.2022.3.2
14. Черницкий А. В. Геологическое моделирование нефтяных залежей массивного типа в карбонатных трещиноватых коллекторах. – М.: ОАО РМНТК Нефтеотдача, 2002. – С. 254.
15. He X., Santoso R., Alsinan M., Kwak H., Hoteit H. Constructing Dual-Porosity Models from High-Resolution Discrete-Fracture Models Using Deep Neural Networks. // SPE Reservoir Simulation Conference. – 2021. DOI: 10.2118/203901-ms
16. Hennings P., Allwardt P., Paul P., Zahm Ch., Reid R., Alley H., Kirschner R., Lee B., Hough E. Relationship between fractures, fault zones, stress, and reservoir productivity in the Suban gas field, Sumatra, Indonesia. // AAPG Bulletin. – 2012. – Vol. 96. – pp. 753-772. DOI: 10.1306/08161109084
17. Jenkins C., Ouenes A., Zellou A., Wingard J. Quantifying and predicting naturally fractured reservoir behavior with continuous fracture models. // AAPG Bulletin. – Vol. № 11 (93). – 2009. – pp. 1597-1608.
18. Lavoine E., Davy P., Darcel C., Munier R. A discrete fracture network model with stress-driven nucleation: impact on clustering, connectivity, and topology. // Frontiers in Physics. – 2020. – pp. 17-26. DOI: 10.3389/fphy. 2020.00009
19. Miloserdova L. V., Dintsova K. I., Khafizov S. F., Iskaziev K. O., Osipov A. V. Connection of lineaments and nodes of their intersections with the oil and gas content of the Caspian syncline and its framing (Russian). // Oil Industry Journal. – 2021. – Vol. 6. – pp. 22-26. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-6-22-26
20. 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 formation of hydrocarbon field in Petrel software EMMFT-2020. // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 24. – p. 03020. DOI: 10.1051/e3sconf/202124403020
21. Panza E., Agosta F., Rustichelli A., Vinciguerra S. C., Ougier-Simonin A., Dobbs M., and

Prosser G. Meso-to-microscale fracture porosity in tight limestones, results of an integrated field and laboratory study. // *Marine and Petroleum Geology*. – 2019. – Vol. 103. – pp. 581-595.

22. Yan L., Liu Q., Liu X. Research on 3D geological modeling of fractured-vuggy carbonate reservoirs. // *Energy Reports*. – 2022. – Vol. 8. – pp. 491-500.

23. Zhang Q., Yan X., Shao J. Fluid flow through anisotropic and deformable double porosity media with ultra-low matrix permeability: A continuum framework. // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 200. – p. 108349.

References

1. Abdullin R. N., Rakhmatullina A. R. An example of practical application of information on fracturing according to well logging data and high-tech methods. *Georesources*. 2018. No. 3. pp. 261-266. (In Russ.)

2. Garifullin R. I., Ghislain de Joussineau, Patrick Rouvroy Fracturing modeling as an important stage in the design of the development of fractured reservoirs. *GeoEurasia 2018. Modern methods of studying and developing of Eurasia*. Publisher: PoliPRESS LLC. 2018. pp. 267-272. (In Russ.)

3. Golovanov M. P., Drozdov V. V. Experience of lineament analysis in the Ciscaucasia. Space information in the search, exploration and operation of gas fields: results and prospects for use. Moscow. Proceedings of VNIIGAZ, 1987. pp. 61-68. (In Russ.)

4. Danilova E. A., Dryagin V. V. Application of seismic and seismoacoustic methods to identify migration routes of hydrocarbon and enhanced oil recovery in zones of tectonic faults in the Vostochnobortovaya oil and gas region of the Peri-Caspian Depression. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12 (3). pp. 79-93. DOI: 10.46698/VNC.2022.12.99.005. (In Russ.)

5. Korchuganova N. I., Korsakov A. K. Remote methods of geological mapping: textbook. Moscow. KDU, 2009. 288 p. (In Russ.)

6. Letavin A. I., Orel S. M., Chernyshev S. M. et al. Tectonics and oil and gas potential of the North Caucasus. Moscow. Nauka, 1987. 94 p. (In Russ.)

7. Miloserdova L. V. Aerospace methods in oil-and-gas geology: Textbook / Ed. P. V. Florensky. Moscow. Nedra Publishing House LLC, 2022. 502 p. Text electronic edition. (In Russ.)

8. Morozovsky N. A., Kremenetsky M. I., Sirota A. S. Localization of carbonate reservoir zones based on the results of hydrodynamic studies of wells. *Neftyanoe Khozyaistvo*. 2014. No. 8. pp. 44-47. (In Russ.)

9. Orekhov A. N., Amani Mangua Mark M. Possibilities of geophysical methods for predicting reservoirs fracturing. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. 2019. No. 6. pp. 198-209. (In Russ.)

10. Simonenko E. P., Dolgirev S. S., Kirichenko Yu. V. The possibilities of well logging data methods for studying fracturing. *Georesources*. 2018. No. 3. pp. 267-273. (In Russ.)

11. Khasanov M. A. Filtration-permeability model of reservoirs rocks of the Lower Triassic of the Eastern Fore-Caucasus. *Journal KAROTAZHNIK*. 2011. No. 4 (202). pp. 12-19. (In Russ.)

12. Khasanov M. A., Ezirbaev T. B., Eljaev A. S. Spatial distribution of Permian-Triassic deposits of the Eastern Ciscaucasia and their oil-and-gas potential. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10 (2). pp. 113-126. DOI: 10.46698/VNC.2020.17.62.008. (In Russ.)

13. Chernenko K. I., Yeriomina N. V., Tumanova Ye. Yu. Linear zones of increased oil productivity in the carbonate reservoir of the Pushkarskoe area of Zimne-Stavkinsko-Pravoberezhnoye field. *Science. Innovation. Technologies*. 2022. No. 3. pp. 29-46. DOI: 10.37493/2308-4758.2022.3.2/ (In Russ.)

14. Chernitsky A. V. Geological modeling of oil deposits of massive type in carbonate fractured reservoirs. Moscow. OJSC RMNTK Nefteotdacha, 2002. pp. 254. (In Russ.)

15. He X., Santoso R., Alsinan M., Kwak H., Hoteit H. Constructing Dual-Porosity Models

from High-Resolution Discrete-Fracture Models Using Deep Neural Networks. SPE Reservoir Simulation Conference. 2021. DOI:10.2118/203901-ms

16. Hennings P., Allwardt P., Paul P., Zahm Ch., Reid R., Alley H., Kirschner R., Lee B., Hough E. Relationship between fractures, fault zones, stress, and reservoir productivity in the Suban gas field, Sumatra, Indonesia. AAPG Bulletin. 2012. 96. pp. 753-772. DOI:10.1306/08161109084

17. Jenkins C., Ouenes A., Zellou A., Wingard J. Quantifying and predicting naturally fractured reservoir behavior with continuous fracture models. AAPG Bulletin. 2009. Vol. 11 (93). 2009. pp. 1597-1608.

18. Lavoine E., Davy P., Darcel C., Munier R. A discrete fracture network model with stress-driven nucleation: impact on clustering, connectivity, and topology. Frontiers in Physics. 2020. pp. 17-26. DOI: 10.3389/fphy. 2020.00009

19. Miloserdova L. V., Dintsova K. I., Khafizov S. F., Iskaziev K. O., Osipov A. V. Connection of lineaments and nodes of their intersections with the oil and gas content of the Caspian syncline and its framing (Russian). Oil Industry Journal. 2021. Vol. 6. pp. 22-26. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-6-22-26

20. 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 formation of hydrocarbon field in Petrel software EMMFT-2020. E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 24. p. 03020. DOI: 10.1051/e3sconf/202124403020

21. Panza E., Agosta F., Rustichelli A., Vinciguerra S. C., Ougier-Simonin A., Dobbs M., and Prosser G. Meso-to-microscale fracture porosity in tight limestones, results of an integrated field and laboratory study. Marine and Petroleum Geology. 2019. Vol. 103. pp. 581-595.

22. Yan L., Liu Q., Liu X. Research on 3D geological modeling of fractured-vuggy carbonate reservoirs. /Energy Reports. 2022. Vol. 8. pp. 491-500.

23. Zhang Q., Yan X., Shao J. Fluid flow through anisotropic and deformable double porosity media with ultra-low matrix permeability: A continuum framework. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 200. p. 108349.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 548.1

DOI: [10.46698/VNC.2022.28.26.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.28.26.009)

Оригинальная статья

Оценка устойчивости плоской поверхности
кристалла при фазовом превращении
в однокомпонентной системеИ. И. Босиков¹, Р. В. Ключев², А. И. Мазко¹, О. Г. Бурдзиев¹¹Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Россия, 362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44;²Московский политехнический университет, Россия, 107203, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38, e-mail: kluev-roman@rambler.ru;

Статья поступила: 27.10.2022, доработана: 22.11.2022, принята к публикации: 29.11.2022

Резюме: Актуальность работы. Теория фазовых переходов сформулирована для описания эволюции неравновесных систем вблизи от термодинамического равновесия. В течение последних трех десятилетий накоплен обширный экспериментальный материал по высокоскоростным фазовым переходам, из которого следует, что многие метастабильные системы способны претерпевать превращения вдали от термодинамического равновесия, когда нарушаются условия локального равновесия в системе. В статье рассматривается оценка устойчивости плоской поверхности кристалла при фазовом превращении в однокомпонентной системе. **Цель исследований.** Оценка устойчивости плоской поверхности кристалла при фазовом превращении в однокомпонентной системе, анализ высокоскоростных режимов движения фазовой границы и решение ряда задач формирования кристаллической структуры в системах. **Методика исследований.** Аналитические, математические методы. Феноменологическое и микроскопическое описание однокомпонентной системы. **Результаты исследований.** Исследована морфологическая устойчивость плоской поверхности кристалла, растущего внутри исходной фазы при следующей схеме теплообмена: скрытая теплота превращения отводится от границы раздела в обе фазы и за счет внешнего теплообмена – в термостат с заданной температурой. Устойчивость определяется температурой термостата, условиями теплообмена, поверхностным натяжением и кинетикой процессов на границе фаз (натяжение и кинетика считаются изотропными, и механизм роста – нормальным). Выявлена сложная картина чередования областей устойчивости и неустойчивости. Для превращения высокотемпературной фазы в низкотемпературную по мере увеличения переохлаждения имеем в общем случае следующее чередование: устойчивость, неустойчивость, устойчивость, неустойчивость, устойчивость. При обратном превращении: устойчивость, неустойчивость, устойчивость. В адиабатических условиях, когда внешний теплообмен отсутствует, часть областей устойчивости исчезает и имеем: неустойчивость, устойчивость, неустойчивость для прямого превращения и неустойчивость, устойчивость для обратного (в адиабатическом случае анализ справедлив при $(T_0 - T_\infty) > L/c_2$, T_0 и T_∞ – температуры равновесия и исходной фазы вдали от растущего кристалла, L – теплота превращения, c_2 – теплоемкость исходной фазы). При очень интенсивном внешнем теплообмене (изотермическое превращение) плоский фронт устойчив при любых температурах. Даны оценки критических температур перехода от устойчивости к неустойчивости. Эти оценки согласуются с данными экспериментов по кристаллизации циклогексанола.

Ключевые слова: температуры равновесия и исходной фазы вдали от растущего кристалла, устойчивость, теплота превращения, теплоемкость исходной фазы, термостат с заданной температурой, механизм роста.

Для цитирования: Босиков И. И., Ключев Р. В., Мазко А. И., Бурдзиев О. Г. Оценка устойчивости плоской поверхности кристалла при фазовом превращении в однокомпонентной системе. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (4): 114-128. DOI: [10.46698/VNC.2022.28.26.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.28.26.009).

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION
OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY

DOI: [10.46698/VNC.2022.28.26.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.28.26.009)

Original paper

Evaluation of the stability of a flat surface
of a crystal under a phase transformation
in a single-component systemI. I. Bosikov¹, R. V. Klyuev², A. I. Masko¹, O. G. Burdzhev¹¹North Caucasian institute of Mining and Metallurgy (State Technological University),
44 Nikolaeva Str., Vladikavkaz 362021, Russian Federation;²Moscow Polytechnic University, 38 BolshayaSemenovskaya Str., Moscow 107203, Russian
Federation, e-mail: kluev-roman@rambler.ru;

Received: 27.10.2022, revised: 22.11.2022, accepted: 29.11.2022

Abstract: Relevance. The theory of phase transitions was formulated to describe the evolution of nonequilibrium systems near thermodynamic equilibrium. Over the past three decades, extensive experimental material has been accumulated on high-speed phase transitions, from which it follows that many metastable systems are capable of undergoing transformations far from thermodynamic equilibrium when the conditions of local equilibrium in the system are violated. The article considers the assessment of the stability of a flat surface of a crystal during a phase transformation in a one-component system. **The aim of the research** is to assess the stability of a flat surface of a crystal during a phase transformation in a single-component system, to analyze high-speed modes of motion of the phase boundary, and to solve a number of problems of the formation of a crystal structure in systems. **Research methodology.** Analytical and mathematical methods. Phenomenological and microscopic descriptions of a one-component system. **Results.** The morphological stability of a flat surface of a crystal growing inside the initial phase was studied under the following heat removal scheme: the latent heat of transformation is removed from the interface to both phases and, due to external heat transfer, to a thermostat with a given temperature. Stability is determined by thermostat temperature, heat transfer conditions, surface tension and kinetics of processes at the phase boundary (tension and kinetics are considered isotropic, and the growth mechanism is normal). A complex pattern of alternating regions of stability and instability is revealed. For the transformation of a high-temperature phase into a low-temperature one, as supercooling increases, we generally have the following alternation: stability, instability, stability, instability, stability. With the reverse transformation: stability, instability, stability. Under adiabatic conditions, when there is no external heat transfer, some of the stability regions disappear and we have: instability, stability, instability for the direct transformation and instability, stability for the reverse (in the adiabatic case, the analysis is valid for $(T_0 - T_\infty) > L/c_2$, T_0 and T_∞ – equilibrium and initial phase temperatures away from the growing crystal, L – heat of transformation, c_2 – is the heat capacity of the initial phase). With a very intense external heat transfer (isothermal transformation), a flat front is stable at any temperature. Estimates are given for the critical temperatures of the transition from stability to instability. These estimates are consistent with experimental data on the crystallization of cyclohexanol.

Keywords: equilibrium and initial phase temperatures far from the growing crystal, stability, heat of transformation, heat capacity of the initial phase, thermostat with a given temperature, growth mechanism.

For citation: Bosikov I. I., Klyuev R. V., Masko A. I., Burdzhev O. G. Evaluation of the stability of a flat surface of a crystal under a phase transformation in a single-component system. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (4): 114-128. DOI: 10.46698/VNC.2022.28.26.009.

Введение

В настоящее время для описания локально-неравновесных систем в целом применяются методы термодинамики необратимых процессов [Тютюнник, 2019;

Королев, Нестеров, 2020]. Они устанавливают связь феноменологического и микроскопического описания однокомпонентной системы. В этой связи существует проблема согласованного описания неравновесных фазовых превращений в рамках термодинамической теории необратимых процессов. Характерным примером фазовых переходов в локальнонеравновесных средах является высокоскоростное затвердевание металлических систем и сплавов. Было установлено, что высокоскоростное затвердевание протекает в условиях, находящихся вдали от локального термодинамического равновесия [Деревич, Панова, 2020; Zicheng, Ydstie, 2022]. При затвердевании глубоко переохлажденного расплава достигаются скорости роста, сопоставимые по величине или превышающие скорость диффузионного распространения компонентов затвердевающей системы. Эта проблема решается в рамках термодинамического описания неравновесных фазовых превращений.

При затвердевании однокомпонентной жидкости морфологическая неустойчивость гладкого фронта возможна только в условиях, когда расплав переохлажден. Неустойчивость при этом возникает вследствие того, что отвод выделяющейся на границе фаз теплоты кристаллизации в переохлажденный расплав облегчается от выступов и затрудняется от впадин на границе раздела. Неустойчивость приводит к образованию разнообразных форм роста, обеспечивающих лучший по сравнению с гладкой формой теплоотвод от границы фаз.

Методика исследований

При проведении исследований применялись аналитические, математические (дискретная математика) методы. Феноменологическое и микроскопическое описания однокомпонентной системы.

Техническая часть. Анализ устойчивости сферического кристалла (рис. 1), растущего в переохлажденном расплаве, показал, что такой кристалл устойчив, если его радиус меньше некоторого критического. Этот анализ проведен в работах [Lee et al., 2022; Ecklebe et al., 2020] с учетом и без учета кинетики процессов на границе, но в обеих работах для малых исходных переохлаждений расплава, когда $0 = (T_0 - T_\infty) c_2 / L \leq 1$, где T_0 – температура плавления, T_∞ – температура расплава вдали от кристалла, L и c_2 – теплота плавления и теплоемкость расплава на единицу объема.

Возникает естественный вопрос об устойчивости при больших переохлаждениях, когда $0 > 1$.

Характерная величина L/c_2 при кристаллизации различных веществ [Chien et al., 2019; Hu et al., 2022] меняется от нескольких десятков (например, для молекулярных кристаллов) до нескольких сотен градусов (для металлов).

Так, например, для белого фосфора [Hu et al., 2022], воды и никеля эта величина равна 25,4; 80 и 400°C соответственно. В случае металлов получение переохлаждений в несколько сотен градусов и изучение процесса в этих условиях – задача весьма сложная. В то же время для фосфора, это вполне осуществимо. Была исследована кинетика продвижения фронта

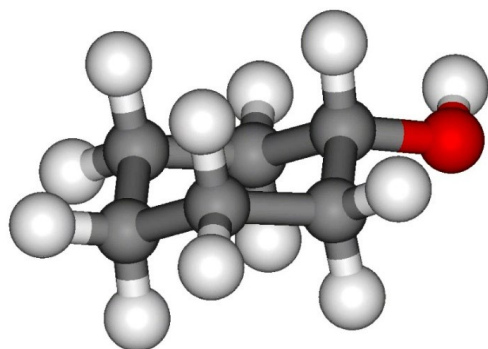


Рис. 1. Кристаллы циклогексанола /
Fig. 1. Cyclohexanol crystals

кристаллизации белого фосфора при переохлаждениях до $1,7 L/c_2$. Их результаты свидетельствуют о том, что во всем изученном диапазоне переохлаждений фронт кристаллизации не был гладким.

Разбираемый в статье вопрос об устойчивости при $0 > 1$ представляется важным не только в случае кристаллизации веществ с малым L/c_2 , но и применительно к полиморфным превращениям в твердом состоянии. В последнем случае легко реализуемы отклонения от равновесия, превышающие величину L/c_2 для таких переходов. При превращениях в твердом состоянии структура фаз формируется под влиянием как напряжений, возникающих в ходе превращения, так и факторов, связанных с перераспределением теплоты превращения, и компонентов, приводящих к морфологической неустойчивости при кристаллизации. Можно думать, что именно эти факторы будут управлять структурой при превращениях в области высоких температур, когда напряжения быстро релаксируют.

Превращения при $0 > 1$ имеют ряд особенностей. При $0 < 1$ рост кристалла гладкой формы (например, рост пластины в толщину, сферы и цилиндра по радиусу) внутри переохлажденной фазы сопровождается приближением температуры границы раздела к точке равновесия T_0 . При этом с течением времени t линейный размер такого кристалла увеличивается пропорционально $t^{1/2}$, а скорость роста убывает как $t^{-1/2}$. Напротив, при $0 > 1$ рост кристаллов гладких форм выходит на стационарный режим, характеризуемый постоянной скоростью роста v . При этом независимо от значения скорости температура поверхности раздела отличается от температуры вдали от кристалла на L/c_2 . Скорость роста в этих условиях не зависит от интенсивности теплоотвода от границы фаз и определяется переохлаждением на ней ($T_0 - T_\infty - L/c_2$). Если при $0 < 1$ можно при больших t описывать кинетику роста без учета кинетического переохлаждения на границе фаз, то при $0 > 1$ это невозможно ни при каких условиях, поскольку именно кинетика процессов на границе и определяет скорость роста.

Все сказанное относится к таким формам кристаллов, которые при $0 < 1$ растут нестационарно со стремящейся к нулю скоростью. Для них $0 = 1$ является особой точкой, в которой нестационарный рост переходит в стационарный. Возможны, однако, формы, растущие с постоянной скоростью и при $0 < 1$. К ним относятся иглообразные и пластинчатые кристаллы [Семенов и др., 2019; Iguchi, 2018]. Они образуются в результате потери устойчивости гладкими формами. При описании их роста необходимо учитывать поверхностные процессы на границе фаз. Применительно к таким формам $0 = 1$ не является какой-либо особой точкой.

Картина, аналогичная описанной, характерна для диффузионных и, по-видимому, бездиффузионных изотермических превращений в сплавах. В этом случае условию $0 < 1$ соответствует превращение в двухфазной, а $0 > 1$ – в однофазной области диаграммы равновесия фаз.

Результаты работы и их обсуждение

Рассмотрим устойчивость поверхности раздела при росте новой фазы 1 внутри исходной фазы 2. Для упрощения выкладок исследуем плоскую границу фаз. Такая граница менее устойчива, чем поверхность сферы, и если она устойчива, то сфера тем более устойчива. Если же плоская граница неустойчива, то и сфера, разрастаясь, рано или поздно потеряет устойчивость.

Поместим начало координат на границу раздела, движущуюся со скоростью v . Плоской границе фаз отвечает $z = 0$, область $z > 0$ занята фазой 2, $z < 0$ – фазой 1.

Примем, что возмущенный фронт имеет форму синусоиды:

$$z = q(x, t) = \delta(t) \sin \omega x. \quad (1)$$

Выясним условия, при которых амплитуда возрастает $\delta(t) > 0$ и фронт неустойчив. Примем, что отвод теплоты превращения происходит в обе фазы, и за счет внешнего теплоотвода – в термостат с температурой T_∞ . Такая схема соответствует превращению в тонких образцах, находящихся в термостате.

Температурные поля $T_i(x, z)$ в движущейся системе координат описываются стационарными уравнениями:

$$\Delta T + \frac{v}{\alpha_i} \frac{\partial T_i}{\partial z} - \beta_i^2 (T_i - T_\infty) = 0, \quad i = 1, 2$$

где β_i^2 – коэффициент теплообмена с термостатом (β_i^2 имеет размерность см^{-2}); $\alpha_i = \lambda_i / c_i$ – температуропроводность; λ_i и c_i – теплопроводность и теплоемкость. Вдали от фронта превращения $T_2(x, \infty) = T_\infty$ и $T_1(x, -\infty) = T_\infty$. В отсутствие внешнего теплообмена температура $T_1(x, -\infty)$ не задается, а определяется из требования ее конечности.

На границе раздела при $z = \varphi$ выполняются следующие условия:

1. Непрерывность температуры $T_1|_\varphi = T_2|_\varphi$
2. Условие теплового баланса. Для малых возмущений:

$$Lv(x) = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_\varphi - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_\varphi \quad (2)$$

где $V(x) = v + \delta \sin \omega x$ – локальная скорость движения границы.

3. Кинетическое соотношение, связывающее локальную скорость $v(x)$, кривизну $K(x)$ и температуру границы $T_s(x)$. При его формулировке примем, что кинетика процессов на границе и поверхностное натяжение σ изотропны и граница движется по нормальному механизму. Не ограничиваясь малыми отклонениями от равновесия, запишем это соотношение в виде:

$$v = n_s \Omega (v_+ - v_-) = n_s \Omega \left[v_2 \exp \left(-\frac{U_2 - \sigma \cdot \Omega \cdot K / 2}{k \cdot T_s} \right) - v_1 \exp \left(-\frac{U_1 - \sigma \cdot \Omega \cdot K / 2}{k \cdot T_s} \right) \right] \quad (3)$$

Здесь первый член равен потоку частиц из фазы 2 в фазу 1, а второй – обратному потоку; n_s и Ω – поверхностная плотность частиц и молекулярный объем, принимаемые одинаковыми в обеих фазах; v_1 , v_2 и U_1 , U_2 – частотные множители и энергии активации для перехода частиц из фазы 1 и из фазы 2 соответственно; $U_1 - U_2 = L \Omega$. Выражение (3) отражает изменение потоков частиц на искривленной поверхности по сравнению с плоской – увеличение потока с выпуклой и уменьшение с вогнутой поверхности (кривизна K принята положительной, когда фронт обращен вогнутостью к фазе 2).

Из выражения (3) при малых отклонениях от равновесия:

$$v = \mu [T_0 + (\sigma K T_0) - T_s] \quad (4)$$

где μ – кинетический коэффициент, равный:

$$\mu = n_s \Omega^2 L v_2 \exp (U_2 / k T_0) / k T_0^2 \quad (5)$$

Для плоского фронта невозмущенные поля температур имеют вид:

$$T_{10}(z) = T_\infty + L v e^{s_1 z} / (\lambda_1 s_1 + \lambda_2 s_2), \quad T_{20}(z) = T_\infty + L v e^{s_2 z} / (\lambda_1 s_1 + \lambda_2 s_2) \quad (6)$$

Скорость v находим из уравнения (3), в котором $K=0$ и:

$$T_s = T_\infty + Lv / (\lambda_1 s_1 + \lambda_2 s_2) \quad (7)$$

Здесь:

$$s_1 = -\frac{v}{2\alpha_1} + \left[\left(\frac{v}{2\alpha_1} \right)^2 + \beta_1^2 \right]^{1/2}; \quad s_2 = -\frac{v}{2\alpha_2} + \left[\left(\frac{v}{2\alpha_2} \right)^2 + \beta_2^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

Поскольку T_s зависит от v , то выражение (3) представляет собой трансцендентное уравнение для v . Это уравнение при любых переохлаждениях ($T_0 - T_\infty$) имеет отличное от нуля решение, и следовательно, всегда существует стационарный режим роста. Если внешний теплоотвод отсутствует ($\beta_1 = \beta_2 = 0$), то такой режим имеется только при $(T_0 - T_\infty) \geq L/c_2$. Отметим, что решения (6) – (8) справедливы как для прямого ($2 \rightarrow 1$), так и для обратного превращения ($1 \rightarrow 2$). В последнем случае $v < 0$, температура на фронте T_s ниже, чем в термостате T_∞ и превращение идет за счет подвода тепла к границе фаз. На рисунке 2 схематично изображены вытекающие из (7), (8) и (3) зависимости температуры фронта и скорости превращения от температуры термостата.

Кривые 1 соответствуют изотермическим условиям ($\beta_1 = \beta_2 = \infty$); 2 – адиабатическим ($\beta_1 = \beta_2 = 0$); 3 – промежуточным.

Синусоидальное возмущение (1) плоской границы вызывает изменение температурных полей, которое находим по выражению:

$$T_1(x, z) = T_{10}(z) + B_1 \varphi e^{p_1 z}; \quad T_2(x, z) = T_{20}(z) + B_2 \varphi e^{-p_2 z}; \quad T_s(x) = T_s + A \varphi(x), \quad (9)$$

где:

$$p_1 = -\frac{v}{2\alpha_1} + \left[\left(\frac{v}{2\alpha_1} \right)^2 + \beta_1^2 + \omega^2 \right]^{1/2}; \quad p_2 = -\frac{v}{2\alpha_2} + \left[\left(\frac{v}{2\alpha_2} \right)^2 + \beta_2^2 + \omega^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

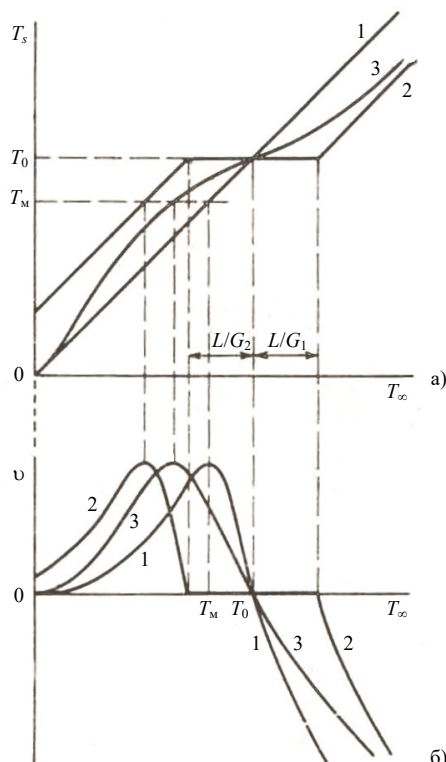


Рис. 2. Схематическое изображение зависимости температуры границы раздела фаз T_s (a) и стационарной скорости движения границы v (b) от температуры термостата T_∞ при различных условиях внешнего теплоотвода /

Fig. 2. Schematic representation of the dependence of the interface temperature T_s (a) and the stationary boundary velocity v (b) on the thermostat temperature T_∞ under various conditions of external heat removal

Неизвестные величины B_1 , B_2 , A и δ определяем из условий на границе раздела $B_1 = A - Lv s_1 / (\lambda_1 s_1 + \lambda_2 s_2)$; $B_2 = A - Lv s_2 / (\lambda_1 s_1 + \lambda_2 s_2)$

$$A = - \left\{ n_s \Omega (v_{+0} - v_{-0}) \frac{\sigma \Omega L \omega^2}{2kT} + \frac{Lv [\lambda_2 s_2 (p_2 - s_2) - \lambda_1 s_1 (p_1 - s_1)]}{\lambda_1 s_1 + \lambda_2 s_2} \right\} [\lambda_1 p_1 + \lambda_2 p_2 + Lv]^{-1} \quad (11)$$

$$\frac{\delta}{\delta} = - \left\{ n_s \Omega (v_{+0} - v_{-0}) \cdot (\lambda_1 p_1 + \lambda_2 p_2) \frac{\sigma \Omega L \omega^2}{2kT_s} + \frac{Lv [\lambda_2 s_2 (p_2 - s_2) - \lambda_1 s_1 (p_1 - s_1)]}{\lambda_1 s_1 + \lambda_2 s_2} \right\} [\lambda_1 p_1 + \lambda_2 p_2 + Lv]^{-1} \quad (12)$$

Где v_{+0} и v_{-0} – частоты перехода атомов на плоской границе:

$$v_{+0} = v_2 \exp(-U_2/kT_s), v_{-0} = v_1 \exp(-U_1/kT_s), v = n_s \Omega (v_{+0} - v_{-0}), \quad (13)$$

где v – скорость движения плоской границы, а v' – ее производная по переохлаждению на границе ($T_0 - T_s$):

$$v = n_s \Omega L (v_{-0} U_1 - v_{+0} U_2) / kT_s^2 \quad (14)$$

Плоский фронт устойчив, когда $\delta < 0$, и неустойчив при $\delta > 0$. Знак δ зависит от знака числителя и знаменателя выражения (12). Первое слагаемое в числителе отражает влияние поверхностного натяжения и всегда отрицательно. Второе слагаемое может быть и положительным и отрицательным, что зависит от знака v' и соотношения теплофизических параметров фаз. Таким образом, числитель в общем случае может менять знак. То же относится и к знаменателю поскольку v' меняет знак при $T_s = T_M$, где T_M – температура максимума на кинетической кривой $v(T_s)$; $v' > 0$ при $T_s > T_M$ и $v' < 0$ при $T_s < T_M$.

Качественный анализ условия устойчивости

Для облегчения анализа выражения (12) рассмотрим частный случай, когда $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, $c_1 = c_2 = c$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$, $\beta_1 = \beta_2 = \beta$. Представим (12) в виде:

$$\frac{\dot{\delta}}{\delta'} = \left[\frac{v' f^2(\omega) - f_1(\omega)}{g(\omega) + Lv'} \right] \quad (15)$$

$$\text{где } f_1(\omega) = n_s \Omega (v_{+0} - v_{-0}) \lambda \left[\left(\frac{v}{2\alpha} \right)^2 + \beta^2 + \omega^2 \right]^{1/2} \frac{\sigma \Omega \omega^2}{kT_s}$$

$$f_2(\omega) = \frac{Lv^2}{2\alpha} \left\{ \left[1 + \frac{\omega^2}{\left(\frac{v}{2\alpha} \right)^2 + \beta^2} \right] - 1 \right\} \quad g(\omega) = 2\lambda \left[\left(\frac{v}{2\alpha} \right)^2 + \beta^2 + \omega^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

Все введенные функции положительны и монотонно возрастают с увеличением ω . В области малых и больших ω имеем: при $\omega^2 < (v/2\alpha)^2 + \beta^2$, $f_1(\omega) \sim \omega^2$, $f_2(\omega) \sim \omega^2$, $g(\omega) \sim \text{const} + \omega^2$; при $\omega^2 > (v/2\alpha)^2 + \beta^2$, $f_1(\omega) \sim \omega^3$, $f_2(\omega) \sim \omega$, $g(\omega) \sim \omega$. Поэтому, если выполняется неравенство $v' f_2''(\omega) - f_2''(\omega) > 0$, числитель меняет знак при некотором критическом значении $\omega = \omega_{c1}$ (при $\omega < \omega_{c1}$ числитель положителен). В то же время, если $g(\omega) + Lv' < 0$, то при другом значении $\omega = \omega_{c2}$ меняет знак знаменатель

(он отрицателен при $\omega < \omega_{c2}$). Изменение знака знаменателем возможно, когда $v' < 0$.

Введем критическую температуру T'_c , такую, что при $T_S = T'_c$ выполняется условие $v'f_2''(0) - f_2'''(0) = 0$. Эта температура разделяет области, в которых числитель может или, напротив, не может менять знак в зависимости от ω . Температура $T_{\gg c}$ обладает аналогичными свойствами в отношении знаменателя. При этой температуре $g(0) + Lv' = 0$. Учитывая определения (16), запишем указанные уравнения для T'_c и $T_{\gg c}$ в виде:

$$v' = \frac{c}{L} \cdot \frac{n_s \Omega^2 \sigma}{2\alpha} \cdot \frac{(v_{+0} + v_{-0})}{kT_S v^2} \cdot [v^2 + (2\alpha\beta)^2]^{1/2}, \text{ при } T'_S = T''_c \quad (17)$$

$$v' = -\frac{c}{L} \cdot [v^2 + (2\alpha\beta)^2]^{1/2} \text{ при } T'_S = T''_c \quad (18)$$

На рисунке 3 схематично показаны зависимости левых и правых частей уравнений (17) и (18) от температуры T_S , плоской границы. Если формально рассматривать эти зависимости во всей области температур $0 < T_S < \infty$, то можно отметить следующее.

При сильном внешнем теплоотводе (большие β) уравнения (17) и (18) не имеют решений. Так, кривые 3 на рисунке 3а, б не пересекаются с кривой v' . В этой ситуации во всей области температур числитель выражения (12) отрицателен, знаменатель положителен, $\delta < 0$ и плоский фронт устойчив. С уменьшением β у уравнений (17) и (18) начинают появляться корни. При этом существуют три различных критических значения $\beta - \beta_{c1} < \beta_{c2} < \beta_{c3}$; при одном появляются решения у уравнения (18), при другом у (17) для прямого превращения (при $T_S < T_0$) и при последнем – у уравнения (17) для обратного превращения. Если выбрать $\beta - \beta_{c1}$, то как видно из рис. 3 (кривые 2) уравнение (18) будет иметь два корня, а (17) – четыре (два при $T_S < T_0$ и два при $T_S > T_0$). Расположим эти температуры в порядке возрастания:

$$T_{c1}, T_{c2}, T_{c3}, T_{c4} (< T_0), T_{c5} (< T_0), T_{c6}$$

(T_{c1} и T_{c2} соответствуют критической температуре T_c », а остальные – T_c ’).

В соответствии с этими температурами имеем несколько чередующихся областей устойчивости и неустойчивости плоского фронта (рис. 3в). Так, например, при $T_{c4} < T_S < T_{c5}$ фронт устойчив, поскольку числитель выражения (12) отрицателен, знаменатель положителен и они не меняют знаков в зависимости от ω . В соседней области температур $T_{c3} < T_S < T_{c4}$ фронт неустойчив, поскольку числитель меняет знак при некотором критическом ω_{c1} .

С уменьшением внешнего теплоотвода расширяются области неустойчивости. При $\beta \rightarrow 0$ (адиабатический процесс) $T_{c1} \rightarrow 0$, T_{c4} и T_{c5} стремятся к T_0 , (см. рис. 3, а, б) и исчезают две области устойчивости, одна из которых в окрестности $T_S = 0$, а другая вблизи $T_S = T_0$.

На рисунке 3, в представлено максимальное количество областей, равное семи и соответствующее $\beta < \beta_{c1}$. С увеличением β число областей уменьшается на две каждый раз, когда β становится равным одному из критических значений β_c . Так, при $\beta_{c1} < \beta < \beta_{c2}$ количество областей равно 5, при $\beta_{c2} < \beta < \beta_{c3}$ – 3, а при $\beta < \beta_{c3}$ имеется только одна область – область устойчивости.

В результате изучения кристаллизации циклогексанола (рис. 1) в тонком препарате при различных температурах термостата, установлено, что при малых переохлаждениях (например, при $T_0 - T_\infty = 0,005^\circ \text{C}$) и при больших ($T_0 - T_\infty = 10^\circ \text{C}$) растут

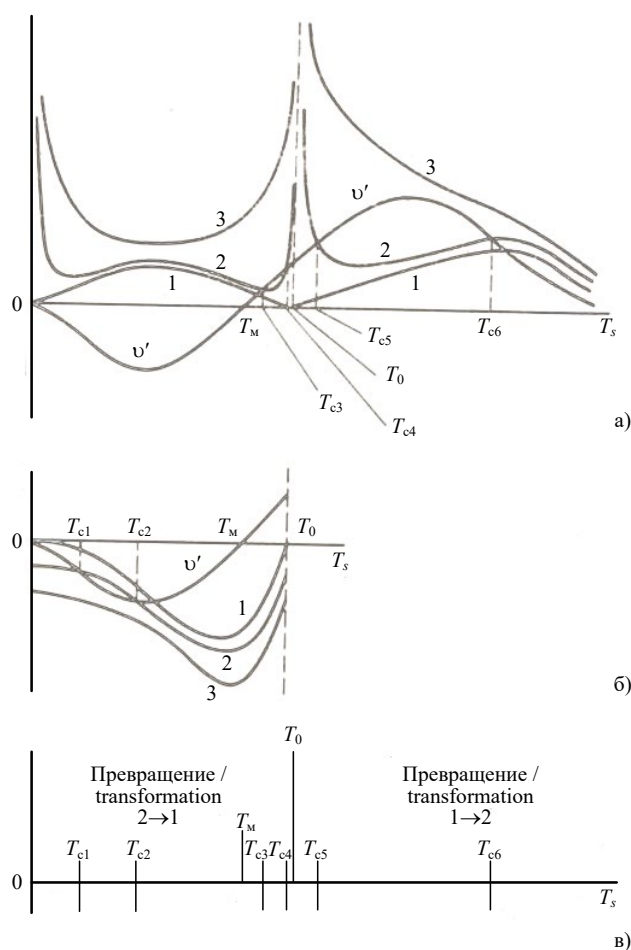


Рис. 3. Схематичное изображение зависимости левой (v') и правой частей уравнения (17) от температуры границы раздела фаз T_s при различных условиях внешнего теплоотвода, иллюстрирующее существование критических температур (а); б – то же для уравнения (18); в – схематичное изображение на оси T_s положения критических температур и областей устойчивости и неустойчивости плоской границы раздела фаз /

Fig. 3. Schematic representation of the dependence of the left (v') and right parts of equation (17) on the temperature of the phase boundary T_s under various conditions of external heat removal, illustrating the existence of critical temperatures (a); b – the same for equation (18); c – schematic representation on the T_s axis of the position of critical temperatures and regions of stability and instability of a flat interface

кристаллы округлой формы, а при промежуточных переохлаждениях (к примеру, при $T_0 - T_\infty = 0,4^\circ \text{C}$) – дендритной. Это качественно согласуется с найденной последовательностью областей устойчивости и неустойчивости при увеличении переохлаждения (рис. 3в).

Кривые 1 соответствуют адиабатическим условиям $\beta=0$, (имеются три критические температуры); 2 – условиям, когда $\beta < \beta_{c1}$ (имеются пять критических температур); 3 – условиям, когда $\beta < \beta_{c3}$ (критических температур нет). Критические температуры указаны для случая 2.

Авторами проведена оценка величин критических температур и установлено что для определения критических температур, разделяющих области устойчивости и неустойчивости, необходимо знать теплофизические свойства фаз, σ , а также кинетическую зависимость $v(T_s)$ в широком интервале температур. Последнее практически отсутствует. Поэтому дадим лишь некоторые оценки. В адиабатических ус-

ловиях ($\beta=0$) имеются три критические температуры T_{c2} , T_{c3} и T_{c6} . На возможность существования температуры T_{c3} впервые указали Шафер и Гликсман. Рассматривая рост сферы в переохлажденном расплаве, они обнаружили, что при переохлаждениях, меньших критического, справедливо выражение:

$$T_0 - T_\infty = T_0 - T_m + L/c = \alpha L / \sigma \mu T_0 \text{ или } (T_0 - T_S) c / L = \alpha L / \sigma \mu T_0, \quad (19)$$

Скорость роста в функции радиуса сферы проходит через максимум, а при больших переохлаждениях монотонно возрастает, приближаясь к стационарной величине. На этом основании они предположили, что в первом случае поверхность сферы неустойчива, во втором – устойчива, а (19) определяет границу этих областей. Нетрудно видеть, что (19) совпадает с условием (17), если критическая температура T_{c3} близка к T_0 . Однако эта температура близка не к T_0 , а к T_m .

Для оценки T_{c3} опишем $v(T_S)$ квадратичной функцией:

$$v = \mu [(T_0 - T_m)^2 - (T_S - T_m)^2] / 2(T_0 - T_m) \quad (20)$$

и примем $n_s \Omega L (v_{-0} - v_{+0}) / k T_S \approx \mu T_0 / L$. Тогда из (17) имеем $(T_{c3} - T_m) / (T_0 - T_m) \approx \mu T_0 - (T_0 - T_m) c \sigma / 2 L^2 \alpha$.

Из условия $v'(T_m) \approx v'(T_0) - (T_0 - T_m) v''(T_0) = 0$, учитывая (13), получим:

$$(T_0 - T_m) \approx T_0 [(U_1 + U_2 / k T_0) - 2]$$

Рассмотрим два примера – кристаллизацию белого фосфора и свинца. Для белого фосфора: $T_0 = 317^\circ\text{K}$, $L \Omega / k T_0 = 1$, $L/c = 25,4^\circ\text{C}$, $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{сек}$, $\sigma/L = 2,2 \cdot 10^{-8} \text{ см}$, $\mu = 17,7 \text{ см}/\text{сек} \cdot ^\circ\text{C}$. Для свинца: $T_0 = 600^\circ\text{K}$, $L \Omega / k T_0 = 1$, $L/c = 151^\circ\text{C}$, $\alpha = 0,094 \text{ см}^2/\text{сек}$, $\sigma/L = 1,22 \cdot 10^{-8} \text{ см}$, μ примем равным $50 \text{ см}/\text{сек} \cdot ^\circ\text{C}$.

В случае кристаллизации величину U_2 обычно отождествляют с энергией активации вязкости расплава. Для фосфора и свинца U_2/kT_0 равна 3,7 и 2 соответственно. Учитывая это, находим для белого фосфора $T_0 - T_m \approx 50^\circ\text{C}$ и $T_{c3} - T_m \approx 7^\circ\text{C}$, для свинца $T_0 - T_m \approx 200^\circ\text{C}$ и $T_{c3} - T_m \approx 0,5^\circ\text{C}$. Критическое переохлаждение расплава, соответствующее T_{c3} , равно $T_{c3} - T_\infty \approx 68^\circ\text{C}$ для фосфора и 350°C для свинца.

Критическая температура T_{c3} близка к T_m . Устойчивость при $T_S < T_{c3}$ связана, грубо говоря, с тем, что выступ на фронте, имея более низкую температуру, чем плоский фронт, растет в этих условиях медленней. Однако, согласно (9) и (15), температура на выступе ниже ($A < 0$) при любых ω , если $T_S < T_{c2}$. Ниже второй критической температуры T_{c2} знаменатель в выражениях (15) может менять знак. Там, где он отрицателен (т.е. при $\omega < \omega_{c2}$) $A > 0$, температура на выступе выше, чем на плоском фронте, выступ растет быстрее и плоский фронт опять неустойчив.

Поскольку $T_{c2} < T_m$, то для оценки можно принять, что при $T_S = T_{c2}$ частота v_{-0} переходов частиц из фазы 1 в фазу 2 мала по сравнению с частотой v_{+0} . Тогда $v'/v \approx -U_2/kT_S^2$ и, согласно (18), при $\beta = 0$ имеем $(T_{c2}/T_0)^2 \approx (U_2/kT_0) \cdot (Lc/T_0)$. Для фосфора это дает $T_{c3}/T_0 \approx 0,55$, а для свинца 0,7. Соответствующие переохлаждения расплава 170°C для фосфора и 330°C для свинца.

При плавлении не удастся получить заметных исходных перегревов. Необходимые же перегревы для достижения температуры T_{c6} при адиабатическом процессе во всяком случае выше L/c .

В неадиабатических условиях ($\beta \neq 0$) плоский фронт более устойчив. Уже отмечалось, что существуют критические значения β_C , при которых исчезают отдельные области неустойчивости. Оценим зависимость критических температур от β и значения β_C . При этом рассмотрим только температуры T_{c3} и T_{c4} , поскольку остальные

(за исключением T_{c5}) экспериментально трудно реализуемы. В случае интенсивного теплоотвода, когда $2\beta\alpha$ много больше максимальной скорости v (T_m), уравнение (17), учитывая (20), можно записать в виде:

$$X(1-X_2)^2 \approx 32c T_0 \sigma \alpha^2 \beta^3 / L^2 \mu^2 (T_0 - T_m)^2, \text{ где } X = (T_s - T_m) / (T_0 - T_m). \quad (21)$$

Левая часть (21) равна нулю при $X=0$ и $X=1$ и принимает максимальное значение 0,286 при $X=0,447$. Поэтому уравнение (21) имеет два решения T_{c3} и T_{c4} при $\beta < \beta_C$, где

$$\beta_C \approx [0,009 L^2 \mu^2 (T_0 - T_m)^2 / c T_0 \sigma \alpha^2]^{1/3} \quad (22)$$

и не имеет решений при $\beta > \beta_C$. При малых β (но $2\beta\alpha > v$) критические температуры описываются выражениями:

$$(T_{c3} - T_m) / (T_0 - T_m) \approx 32c T_0 \sigma \alpha^2 \beta^3 / L^2 \mu^2 (T_0 - T_m)^2,$$

$$(T_0 - T_{c4}) / (T_0 - T_m) \approx [8c T_0 \sigma \alpha^2 \beta^3 / L^2 \mu^2 (T_0 - T_m)^2]^{1/2}. \quad (23)$$

Вычисление по формуле (22) дает для белого фосфора и свинца соответственно $\beta_C \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ и $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$. В обоих случаях в критической точке T_{c3} и T_{c4} и $(T_{c3} - T_m) / (T_0 - T_m) = 0,45$.

Параметр $1/\beta^2\alpha$ определяет характерное время приближения температуры образца, помещенного в термостат, к температуре термостата. При найденных критических условиях это время для фосфора должно быть порядка $2 \cdot 10^{-8}$ сек, а для свинца 10^{-9} сек. Из этих оценок видно, что критические β_C отвечают очень интенсивному теплообмену, вряд ли реализуемому практически.

Белый фосфор и свинец относятся к веществам, кристаллы которых растут быстро. Рассмотрим кристаллизацию медленно растущего вещества – циклогексанола (рис. 1). В этом случае $T_0 = 298,4^\circ \text{ К}$, $L\Omega/kT_0 = 0,71$, $L/c = 8,5^\circ \text{ С}$, $\alpha = 7,6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{сек}$, по данным о вязкости найдена энергия активации $U_2/kT_0 = 16$, $\mu = 8 \cdot 10^{-5} \text{ см}/\text{сек} \cdot ^\circ \text{ С}$. Кроме того примем $\sigma/L = 2 \cdot 10^{-8} \text{ см}$.

При адиабатических условиях, согласно приведенным формулам, $(T_{c3} - T_m) / (T_0 - T_m) \approx 4 \cdot 10^{-6}$ и $T_0 - T_m \approx 10^\circ \text{ С}$, $T_{c2}/T_0 \approx 0,67$.

Применительно к обсуждаемым в статье вопросам циклогексанола обладает рядом особенностей: величина L/c мала, энергия активации U_2/kT_0 велика и, следовательно, T_m близка к T_0 . Эти обстоятельства облегчают выявление температуры T_{c3} даже в адиабатических условиях эксперимента.

В области 2 (внутри кривой) плоский фронт кристаллизации неустойчив, а в области 1 – устойчив.

Действительно, при этом T_{c3} практически совпадает с T_m и необходимое переохлаждение расплава составляет $T_0 - T_\infty = T_0 - T_m + L/c \approx 18,5^\circ$

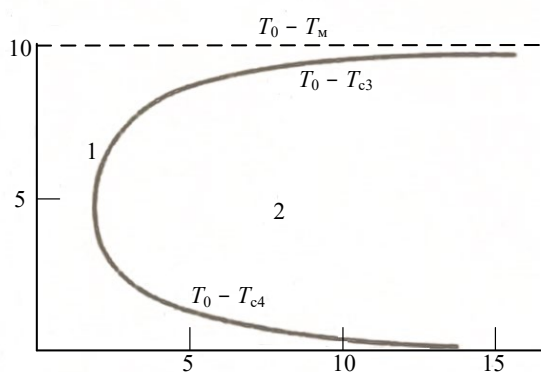


Рис. 4. Зависимость критических переохлаждений $(T_0 - T_{c3})$ и $(T_0 - T_{c4})$ на фронте кристаллизации циклогексанола от параметра $1/\beta^2\alpha$, характеризующего интенсивность внешнего теплоотвода /

Fig. 4. Dependence of critical supercoolings $(T_0 - T_{c3})$ and $(T_0 - T_{c4})$ at the cyclohexanol crystallization front on the parameter $1/\beta^2\alpha$, characterizing the intensity of external heat removal

С. Кроме того, поскольку максимальная скорость роста мала (примерно $4 \cdot 10^{-4}$ см/сек), то легко осуществимы условия, когда того же порядка, что и указанная скорость или больше нее. Следовательно, за счет внешнего теплоотвода можно измеримо воздействовать на критические температуры.

На рисунке 4 изображена зависимость T_{c3} и T_{c4} от параметра $1/\beta^2\alpha$, полученная из решения уравнения (21). Критическое значение β_c , согласно (22), равно 24 см^{-1} и $1/\beta^2\alpha = 2,2$ сек. Если принять $\beta = 10 \text{ см}^{-1}$, то $T_0 - T_{c4} \approx 0,2^\circ\text{C}$ и $T_0 - T_{c3} \approx 9,2^\circ\text{C}$. Эти критические переохлаждения согласуются с данными (значение параметра β в этих экспериментах, однако, не известно). Известны шесть снимков кристаллов, растущих при различных переохлаждениях $T_0 - T_\infty = 0,005; 0,2; 0,4; 2,35; 3,55; 10^\circ\text{C}$. В первом и последнем случаях кристаллы устойчивы. При выбранном $\beta = 10 \text{ см}^{-1}$ переохлаждения на фронте и в термостате практически совпадают. Действительно, используя (7), можно показать, что при малых отклонениях от T_0 отношение этих переохлаждений равно:

$$(T_0 - T_\infty)/(T_0 - T_S) = 1 + \mu L/2c \beta \alpha$$

С увеличением переохлаждения приближается к единице. Из этого следует, что при $\beta = 10 \text{ см}^{-1}$ отличие указанных переохлаждений не превышает 6%.

Выводы

Исследована морфологическая устойчивость плоской поверхности кристалла [Ларионов, Сорокин, 2021; Степанец, 2021, Козлов и др., 2022; Хон и др., 2019; Калашников, Ольчак, 2018], растущего внутри исходной фазы при следующей схеме теплоотвода: скрытая теплота превращения отводится от границы раздела в обе фазы и за счет внешнего теплообмена – в термостат с заданной температурой. Устойчивость определяется температурой термостата, условиями теплообмена, поверхностным натяжением и кинетикой процессов на границе фаз (натяжение и кинетика считаются изотропными, и механизм роста – нормальным). Выявлена сложная картина чередования областей устойчивости и неустойчивости [Босиков, Ключев, 2022; Босиков и др., 2021]. Для превращения высокотемпературной фазы в низкотемпературную по мере увеличения переохлаждения имеем в общем случае следующее чередование: устойчивость, неустойчивость, устойчивость, неустойчивость, устойчивость. При обратном превращении: устойчивость, неустойчивость, устойчивость.

В адиабатических условиях, когда внешний теплообмен отсутствует, часть областей устойчивости исчезает и имеем: неустойчивость, устойчивость, неустойчивость для прямого превращения и неустойчивость, устойчивость для обратного (в адиабатическом случае анализ справедлив при $(T_0 - T_\infty) > L/c_2$, T_0 и T_∞ – температуры равновесия и исходной фазы вдали от растущего кристалла, L – теплота превращения, c_2 – теплоемкость исходной фазы). При очень интенсивном внешнем теплообмене (изотермическое превращение) плоский фронт устойчив при любых температурах. Даны оценки критических температур перехода от устойчивости к неустойчивости. Эти оценки согласуются с данными экспериментов по кристаллизации циклогексанола и другими аналогичными исследованиями в различных литературных источниках [Голик и др., 2020; Чотчаев и др., 2021; Tyulenev et al., 2016].

Литература

1. Босиков И. И., Ключев Р. В., Гаврина О. А. Анализ геолого-геофизических материалов и качественная оценка перспектив нефтегазоносности Южно-Харьбинского участка (Северный Кавказ). // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021. – Т. 11 (1). – С. 6-21. DOI: 10.46698/VNC.2021.36.47.001
2. Босиков И. И., Ключев Р. В. Оценка перспективности территории Березкинского рудного поля при помощи программного продукта Micromine. // *Горные науки и технологии*. – 2022. – № 7 (3). – С. 192-202. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-3-192-202
3. Голик В. И., Бурдзиева О. Г., Дзеранов Б. В. Управление геодинамикой массива путем регулирования величины напряжений. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2020. – Т. 10 (2). – С. 147-160. DOI: 10.46698/VNC.2020.93.21.011
4. Деревич И. В., Панова А. А. Расчет термодинамического равновесия многокомпонентной двухфазной системы на основе минимизации потенциала Гиббса. // *Инженерно-физический журнал*. – 2020. – Т. 93. № 2. – С. 259-273.
5. Калашников Н. П., Ольчак А. С. Отражение и дифракция жестких гамма-квантов от поверхности кристалла. // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2018. – № 4. – С. 25-29. DOI: 10.7868/S0207352818040030
6. Козлов А. А., Аксенов А. С., Большаков Е. С., Иванов А. В., Флид В. Р. Фотонные коллоидные кристаллы с управляемой морфологией. // *Известия Академии наук. Серия химическая*. – 2022. – № 10. – С. 2037-2051.
7. Королев В. А., Нестеров Д. С. К методике определения параметров массопереноса и электрокинетических явлений в грунтах на основе термодинамики необратимых процессов. // *Инженерная геология*. – 2020. – Т. 15. – № 4. – С. 20-29. DOI: 10.25296/1993-5056-2020-15-4-20-28
8. Ларионов К. В., Сорокин П. Б. Исследование плёнок монокристаллической толщины: современное состояние. // *Успехи физических наук*. – 2021. Т. 191. № 1. – С. 30-51. DOI: 10.3367/UFNr. 2020.03.038745
9. Семенов В. В., Золотарева Н. В., Новикова О. В., Петров Б. И., Разов Е. Н., Круглов А. В. Образование двух типов пластинчатых кристаллов в реакции иттербия (0) и оксида иттербия (III) с (1-гидроксиэтилен) дифосфоновой кислотой. // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия*. – 2019. – Т. 11. № 1. – С. 58-67. DOI: 10.14529/chem190107
10. Степанцов Е. А. Планарные структуры нанопустот в объеме кристалла. // *Наукоемкие технологии*. – 2021. – Т. 22. № 4. – С. 60-65. DOI: 10.18127/j22250980-202002-01
11. Тютюнник В. М. Информационные потоки в моделях термодинамики необратимых процессов и самоорганизации. // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2019. – № 4. – С. 27-31.
12. Хон Ю. А., Запольски Г., Каминский П. П., Слядников Е. Е. Динамические пространственно-временные структуры на поверхности нагруженных твердых тел. // *Физика твердого тела*. – 2019. – Т. 61. № 4. – С. 719-723. DOI: 10.21883/FTT. 2019.04.47419.293
13. Чотчаев Х. О., Бурдзиева О. Г., Заалишвили В. Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021. – Т. 11 (1) – С. 81-94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007
14. Ecklebe S., Woittennek F., Winkler J. Control of the Vertical Gradient Freeze crystal growth process via backstepping. // *IFAC-PapersOnLine*. – 2020. – Vol. 53. Iss. 2. – pp. 7758-7764. DOI: 10.1016/j. ifacol. 2020.12.1537
15. Chien N., Shin H., Song J. Y. Sn-assisted solid state crystallization of red phosphorus to black phosphorus. // *Scripta Materialia*. – 2019. – Vol. 177. – pp. 128-131. DOI: 10.1016/j. scriptamat. 2019.10.022

16. Hu J., Liu W., Zhang W.-X. Direct functionalization of white phosphorus by organolithium reagents to organophosphorus compounds // *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*. – 2022. – Vol. 197. Iss. 5-6. – pp. 398-407. DOI: 10.1080/10426507.2021.2008933
17. Iguchi M. Memoir: A polymer whisker – The needle-shaped single crystal of polyoxymethylene. // *Polymer*. – 2018. – Vol. 168. – pp. 255-268. DOI: 10.1016/j. polymer. 2018.09.056
18. Lee Ch., Yoon S., Park J., Kim H., Li Y., Jeong D., Kim S., Kwak S., Kim J. Phase-field computations of anisotropic ice crystal growth on a spherical surface. // *Computers & Mathematics with Applications*. – 2022. – Vol. 125. – pp. 25-33. DOI: 10.1016/j. camwa. 2022.08.035
19. Tyulenev M.A., Zhironkin S.A., Garina E.A. The method of coal losses reducing at mining by shovels. // *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. – 2016. – № 7 (4). – pp. 363-370. DOI: 10.1504/IJMM. 2016.079990
20. Zicheng C.Z., Ydstie B.E. Passivity of single-phase thermodynamic systems with equilibrium reactions. // *IFAC-PapersOnLine*. – 2022. – Vol. 55. Iss. 7. – pp. 248-253. DOI: 10.1016/j. ifacol. 2022.07.452

References

1. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Gavrina O. A. Analysis of geological-geophysical materials and qualitative assessment of the oil and gas perspectives of the Yuzhno-Kharbizhinsky area (Northern Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11 (1). pp 6-21. DOI: 10.46698/VNC.2021.36.47.001. (In Russ.)
2. Bosikov I. I., Klyuev R. V. Assessment of Berezhinskoye ore field prospectivity using Micromine software. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022. Vol. 7 (3). pp. 192-202. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-3-192-202. (In Russ.)
3. Golik V. I., Burdzheva O. G., Dzeranov B. V. Ground geodynamics control by regulating stress level. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10 (2). pp. 147-160. DOI: 10.46698/VNC.2020.93.21.011 (in Russ.)
4. Derevich I. V., Panova A. A. Calculation of the thermodynamic equilibrium of a multicomponent two-phase system based on minimization of the Gibbs potential. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2020. Vol. 93. No. 2. pp. 247-260. (In Russ.)
5. Kalashnikov N. P., Olchak A. S. Refraction and diffraction of hard gamma quanta from crystal surface. *Poverkhnost'. rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya*. 2018. No. 4. pp. 25-29. DOI: 10.7868/S0207352818040030 (In Russ.)
6. Kozlov A. A., Aksenov A. S., Bolshakov E. S., Ivanov A. V., Flid V. R. Colloidal photonic crystals with controlled morphology. *Izvestiya Akademii nauk. Seriya Khimicheskaya*. 2022. No. 10. pp. 2037-2051 (In Russ.)
7. Korolev V. A., Nesterov D. S. To the method of determining the parameters of mass transfer and electrokinetic phenomena in soils based on the thermodynamics of irreversible processes. *Engineering geology world*. 2020. Vol. 15. No. 4. pp. 20-29. DOI: 10.25296/1993-5056-2020-15-4-20-28 (In Russ.)
8. Larionov K. V., Sorokin P. B. Investigation of atomically thin films: state of the art. *Physics-Uspekhi*. 2021. Vol. 64. No. 1. pp. 28-47. DOI: 10.3367/UFNr. 2020.03.038745 (In Russ.)
9. Semenov V. V., Zolotareva N. V., Novikova O. V., Petrov B. I., Razov E. N., Kruglov A. V. Formation of two types of plate crystals in the reaction of ytterbium (0) and ytterbium (III) oxide with (1-hydroxyethylidene) diphosphonic acid. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chemistry*. 2019. Vol. 11. No. 1. pp. 58-67. DOI: 10.14529/chem190107 (In Russ.)
10. Stepantsov E. A. Planar structures of nanovoids in volume of a crystal. *Science intensive technologies*. 2021. Vol. 22. No. 4. pp. 60-65. DOI: 10.18127/j22250980-202002-01 (In Russ.)

11. Tyutyunnik V.M. Information flows in models of thermodynamics of irreversible processes and self-organization. Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics. 2019. No. 4. pp. 27-31. (In Russ.)
12. Khon Y.A., Kaminskii P.P., Slyadnikov E.E., Zapolsky H. Dynamic spatial and temporal structures on the surface of solids under load. Physics of the Solid State. 2019. Vol. 61. No. 4. pp. 719-723. DOI: 10.21883/FTT.2019.04.47419.293 (In Russ.)
13. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high mountainous areas by geoecological loads caused by geodynamic and climatic influences. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11 (1). pp. 81-94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007 (In Russ.)
14. Ecklebe S., Woittennek F., Winkler J. Control of the Vertical Gradient Freeze crystal growth process via backstepping. IFAC-PapersOnLine. 2020. Vol. 53. Iss. 2. pp. 7758-7764. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1537
15. Chien N., Shin H., Song J.Y. Sn-assisted solid state crystallization of red phosphorus to black phosphorus. Scripta Materialia, 2019. Vol. 177. pp. 128-131. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2019.10.022
16. Hu J., Liu W., Zhang W.-X. Direct functionalization of white phosphorus by organolithium reagents to organophosphorus compounds. Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements. 2022. Vol. 197. Iss. 5-6. pp. 398-407. DOI: 10.1080/10426507.2021.2008933
17. Iguchi M. Memoir: A polymer whisker – The needle-shaped single crystal of polyoxymethylene. Polymer. 2018. Vol. 168. pp. 255-268. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.09.056
18. Lee Ch., Yoon S., Park J., Kim H., Li Y., Jeong D., Kim S., Kwak S., Kim J. Phase-field computations of anisotropic ice crystal growth on a spherical surface. Computers & Mathematics with Applications. 2022. Vol. 125. pp. 25-33. DOI: 10.1016/j.camwa.2022.08.035
19. Tyulenev M.A., Zhironkin S.A., Garina E.A. The method of coal losses reducing at mining by shovels. International Journal of Mining and Mineral Engineering. 2016. No. 7 (4). pp. 363-370. DOI: 10.1504/IJMME.2016.079990
20. Zicheng C.Z., Ydstie B.E. Passivity of single-phase thermodynamic systems with equilibrium reactions. IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55. Iss. 7. pp. 248-253. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.07.452

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК: 553.411

DOI: [10.46698/VNC.2022.58.17.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.58.17.010)

Оригинальная статья

Потенциально золотonosные минерализации
в углеродистых породах Малка-Муштинского
рудного узла (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: 28.10.2022, доработана: 21.11.2022, одобрена в печать: 25.11.2022

Резюме: Актуальность темы исследования определяется необходимостью изучения вещественного состава и условий формирования крупнообъемных минерализаций и вмещающих черносланцевых пород рудных узлов Северного Кавказа. **Материалы.** Результаты полевых исследований автора различного типа минерализаций и вмещающих черносланцевых пород в коренных обнажениях по берегам долины р. Хасаут Малка-Муштинского рудного узла (ММРУ), шлифы и аншлифы, изготовленные из отобранных штучков, фондовые материалы результатов поисковых работ ООО «Каббалкгеология» 2007-2009 годов. **Методы исследования.** Геологическая документация коренных обнажений, изготовление и изучение под микроскопом шлифов и аншлифов рудных минерализаций и вмещающих пород. **Цель исследования.** Выявить и описать потенциально золотonosные минерализации в черносланцевых породах ММРУ, изучить особенности их вещественного состава и выделить основные минерально-морфологические типы. **Результаты исследования.** Установлена приуроченность потенциально золотonosных минерализаций ММРУ к верхнепротерозойским углеродистым породам верхов малкинской свиты. По особенностям морфологии и вещественному составу выделено три основных минерально-морфологических типа таких минерализаций: сульфидно-вкрапленный, кварцево-жильно-прожилковый и джаспероидный. Первые два типа избирательно развиваются по углеродистым филлитам и филлитовидным сланцам верхней части малкинской свиты, третий тип, джаспероиды – по карбонатным прослоям в углеродистых породах. В составе сульфидно-вкрапленного типа по морфологии и происхождению выделены три разновидности сульфидной минерализации: 1) рассеянная в углеродистых сланцах вкрапленность осадочно-диагенетических сульфидов (преимущественно пирита), 2) сульфидно-кварцевые линзовидные обособления катагенетического и (или) метаморфогенного происхождения, 3) выделения типичных метакристаллов или их сростков, образование которых связано с поздними гидротермально-метасоматическими процессами. Установлено, что кварцево-жильно-прожилковый тип минерализации имеет значительно более широкое распространение, чем сульфидно-вкрапленный или джаспероидный. Он представлен скоплениями сближенных однообразно- и (или) разно ориентированных убогосульфидных и малосульфидных жил и прожилков преимущественно кварцевого и кварц-полевошпатового состава в углеродистых сланцах, образующих в совокупности субсогласные штокверки, часто подверженные более поздним дислокациям. Впервые на территории ММРУ в составе малкинской свиты выявлены прослои и линзы джаспероидов в черносланцевой толще, несущие тонко вкрапленную сульфидизацию, преимущественно пирита.

Ключевые слова: черные сланцы, рудная минерализация, золото, сульфиды, кварцевые жилы, джаспероиды

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

Для цитирования: Парада С. Г. Потенциально золотonosные минерализации в углеродистых породах Малка-Муштинского рудного узла (Северный Кавказ). *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (4): 129-141. DOI: [10.46698/VNC.2022.58.17.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.58.17.010).

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION
OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY

DOI: [10.46698/VNC.2022.58.17.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.58.17.010)

Original article

Potentially gold-bearing mineralization
in carbonaceous rocks of the Malka-Mushta
ore node (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: 28.10.2022, revised: 21.11.2022, accepted: 25.11.2022

Abstract: The relevance of the research topic is determined by the need to study the material composition and conditions for the formation of large-volume mineralizations and enclosing black shale rocks of ore nodes of the North Caucasus. **Materials.** The results of the author's field studies of various types of mineralization and enclosing black shale rocks in the bedrock outcrops along the banks of the Khasaut River valley of the Malka-Mushtinsky ore node (MMRU), slabs and anshlifs made from selected ores, stock materials of the results of prospecting works of Kabbalkgeology LLC 2007-2009. **Methods.** Geological documentation of the bedrock outcrops, production and microscopic examination of cuts and anshlifs of ore mineralization and host rocks. **Aim.** To identify and describe potentially gold-bearing mineralizations in the black shale rocks of the MMRU, to study the features of their material composition and to identify the main mineral-morphological types. **Results.** It is established that the potentially gold-bearing mineralizations of the MMRU are confined to the Upper Proterozoic carbonaceous rocks of the upper Malkin formation. According to morphology and material composition, three main mineral-morphological types of such mineralizations are distinguished: sulfide-interspersed, quartz-vein-veined and jasperoid. The first two types selectively develop from carbonaceous phyllites and phyllite – like shales of the upper part of the Malkin formation, the third type, jasperoids, from carbonate interlayers in carbonaceous rocks. In the composition of the sulfide-interspersed type, three varieties of sulfide mineralization are distinguished by morphology and origin: 1) inclusions of sedimentary-diagenetic sulfides (mainly pyrite) scattered in carbonaceous shales, 2) sulfide-quartz lenticular separations of catagenetic and (or) metamorphogenic origin, 3) isolation of typical metacrystals or their accretions, the formation of which is associated with late hydrothermal-metasomatic processes. It has been established that the quartz-vein-veined type of mineralization has a much wider distribution than sulfide-interspersed or jasperoid. It is represented by clusters of converging monotonously and (or) differently oriented low-sulfide and low-sulfide veins and veins of predominantly quartz and quartz-feldspar composition in carbonaceous shales, forming in aggregate sub-consistent stockwork, often subject to later dislocations. For the first time in the territory of the MMRU as part of the Malkin formation, interlayers and lenses of jasperoids in the black shale thickness bearing finely interspersed sulfide mineralization, mainly of pyrite composition, were revealed.

Keywords: black shales, ore mineralization, gold, sulfides, quartz veins, jasperoids

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. Potentially gold-bearing mineralizations in carbonaceous rocks of the Malka-Mushta Ore node (North Caucasus). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2022. 12 (4): 129-141. DOI: 10.46698/VNC.2022.58.17.010.

Введение

Условия образования золоторудных месторождений в черносланцевых толщах по-прежнему остаются предметом дискуссий. Это связано, во-первых, с возможным наличием различных генетических типов оруденения в углеродистых толщах, и, во-вторых, с вопросами источников рудоносных минерализаций и собственно самого золота.

Ранее развивалась гипотеза классического магматогенно-гидротермального происхождения руд, согласно которой под рудными полями расположены локальные очаги гранитизации углеродистых пород, над которыми возникают потоки сверхкритических восстановленных газов, что приводит к образованию рассеянного аморфного углеродистого вещества, антраксолита или графита. Свободные формы углерода, как и вода, являются продуктами окисления мантийных водно-углеводородных и восстановленных газов в земной коре [Иванкин, Назарова, 1988, и др.].

В. А. Буряк на примере месторождения Сухой Лог и ряда других золоторудных объектов Ленского района (Иркутская область) разработал и всесторонне обосновал модель метаморфогенно-гидротермального рудообразования [Буряк, 1975]. В предложенной концепции главная рудоконцентрирующая роль принадлежит процессам зонального регионального метаморфизма терригенных толщ. Непосредственно из боковых пород изымается не более 5-15% золота, которое содержится в руде, а основное его количество поступает из зон высокотемпературного метаморфизма и гранитизации; кремнезем и железо, изымаются непосредственно из вмещающих боковых пород [Буряк, 1975]. По результатам исследований золоторудных месторождений Казахстана ученые ЦНИГРИ стали развивать гипотезу полигенного вулканогенно-осадочного генезиса ряда месторождений в черносланцевых толщах [Фогельман и др., 1995 и др.].

На основе изучения золотоносности черносланцевых толщ Южного Тянь-Шаня обоснована модель осадочно-метаморфогенного золотого оруденения центральных Кызылкумов (Узбекистан) и выделение самостоятельной углеродистой золоторудной формации [Гарьковец, 1976].

Таким образом, имеется ряд гипотез: магматогенно-гидротермальная, метаморфогенно-гидротермальная, осадочно-гидротермальная, седиментогенная. Наиболее значительную поддержку получила гипотеза метаморфогенного генезиса золоторудной минерализации в черносланцевых толщах, согласно которой минералообразующий раствор формируется из направленных потоков термодегитратационных (метаморфогенных) флюидов, выделяющихся из осадочной толщи в процессе регионального метаморфизма [Буряк, 1975; Hagemann, Cassidy, 2000; Groves, 2003; Pirajno, 2009; Goldfarb, Groves, 2015 и др.]. Вместе с тем, присутствие на многих рудных полях интрузивных пород, позволяет некоторым исследователям считать определяющим при формировании золоторудных месторождений магматический источник [Lang, Baker, 2001; Distler et al., 2004; Graupner et al., 2006; Aristov, 2019; Voisey et al., 2020].

Часто на многих месторождениях, локализованных в черносланцевых толщах, отмечаются различные сочетания признаков седиментогенного, вулканогенного, метаморфогенного, магматогенного происхождения, что и приводит к появлению различных гипотез их происхождения. Объяснение этим фактам нашло отражение в гипотезе полигенно-полихронного формирования таких месторождений [Кокин, 1990; Курбанов и др., 1992; Парада, 2002; Чернышев и др., 2011; Кряжев, 2017 и др.].

В работах А. В. Кокина, на примере месторождений, локализованных в углеродисто-терригенных породах верхоянского комплекса (Якутия), показано, что с каждым этапом геологического развития региона источники золота трансформируются, то есть эволюционируют [Кокин, 1990]. В качестве первичного источника А. В. Кокин обосновал наличие отдельных, обогащенных золотом слоев углеродистых пород.

Группа исследователей из ИГЕМ РАН, обратила внимание на региональное развитие зон тонко вкрапленной сульфидизации в черносланцевых толщах, предположив, что они являются важнейшим металлогеническим ресурсом и источником золота, платиноидов и др. металлов при эндогенном рудообразовании [Сидоров, Томсон, 2000 и др.]. Однако, ни А. В. Кокин, ни А. А. Сидоров с коллегами, не отвечают на главный вопрос, – первопричины появления обогащенных золотом или золотоносными сульфидами участков черносланцевых толщ.

Ответ на этот вопрос содержится в работах С. Г. Парады, где развивается концепция, согласно которой, на разных стадиях литогенеза в больших объемах горных пород могут формироваться осадочно-диагенетические сульфиды, субмаринные эксгальационно-осадочные сульфидные и сульфидно-кремнистые образования, а на стадии катагенеза – латераль-секреционные кварцевые жилы и прожилки [Парада, 2002]. Все эти литогенные по-сути образования могут содержать относительно повышенные концентрации золота и других рудообразующих элементов. Крупнообъемные скопления таких относительно слабо золотоносных минерализаций могли быть источником золота в последующих эндогенных рудообразующих процессах (метаморфогенных и (или) магматогенных), а также частиц самородного золота в аллювиальных россыпях. В связи с изложенным, возникает необходимость изучения вещественного состава и условий формирования таких крупнообъемных минерализаций и вмещающих черносланцевых пород.

Материалы и методы исследования

В настоящем исследовании использованы материалы, полученные в ходе полевых работ, проведенных автором в пределах ММРУ. Наблюдения осуществлялись по коренным обнажениям черных сланцев в бортах долины р. Хасаут. При этом осуществлялся отбор образцов для изготовления шлифов и аншлифов, отбор штучных проб для последующих химических анализов. Использовались также фондовые материалы ООО «Каббалкгеология» с результатами поисковых работ 2007-2009 годов. Основными методами исследования являются полевые геологические наблюдения и документация коренных обнажений, отбор образцов рудоносных минерализаций и вмещающих черносланцевых пород, петрографическое и минераграфическое изучение под микроскопом в шлифах и аншлифах.

Результаты работы и их обсуждение

На Северном Кавказе вот уже более 20 лет проводятся поисковые работы на рудное золото в пределах развития потенциально рудоносных черносланцевых толщ [Гурбанов и др., 2021; Парада, Гамбург, 2022]. Одним из таких объектов стал Малка-Муштинский рудный узел (ММРУ). В период с 2007 по 2009 год большая часть площади ММРУ была охвачена поисковыми работами на золото, проводимыми ООО «Каббалкгеология». По результатам этих работ выявлены относительно слабо золотоносные участки сгущения разно ориентированных кварцевых жил и

прожилков, а также участки скопления сульфидно-вкрапленной минерализации. Границы таких участков определены по результатам опробования и анализа на золото штуфов и бороздовых проб из горных выработок и керновых проб из буровых скважин. Области же распространения сгущений разно ориентированных кварцевых жил и прожилков значительно шире выделенных золотоносных участков. Эти участки названы в отчете геологов залежами, так как они имеют линзообразную и пластообразную форму и приурочены к слоям углеродистых сланцев и филлитов. Следует ожидать, что и все области распространения разно ориентированных кварцевых жил и прожилков имеют такую же пластообразную морфологию. Средние содержания золота в рудоносных залежах кварцево-жильно-прожилкового типа обычно на уровне десятых долей г/т, в залежах сульфидно-вкрапленного типа – и того меньше.

По результатам анализа фондовых материалов и собственных полевых исследований удалось установить, что потенциально золотоносные минерализации Малка-Муштинского рудного узла представлены тремя основными минерально-морфологическими типами: сульфидно-вкрапленный, кварцево-жильно-прожилковый и джаспероидный. Первые два типа избирательно развиваются по графит-биотит-кварцевым сланцам, углеродистым филлитам и филлитовидным сланцам, джаспероиды – по карбонатным прослоям в углеродистых сланцах. Наиболее широко все три типа представлены в верхах малкинской свиты.

Сульфидно-вкрапленный тип

Сульфидная минерализация в углеродистых сланцах ММРУ довольно скудная и представлена, в основном, рассеянной вкрапленностью пирита.

Сульфиды, как и рассеянное углеродистое вещество, обнаруживают признаки перераспределения внутри слоя породы. Количество сульфидов в шлифах наблюдается до 2-3%, максимум 5%. Представлены они, в основном, пиритом. Среди сульфидных выделений отмечаются практически все морфогенетические разности, установленные на типичном представителе месторождений в черносланцевых породах Сухой Лог [Буряк и др., 1975; Distler et al., 2004]. Наиболее ранней формой диагностируется тонкодисперсная рассеянная вкрапленность сульфидов, распределение которой контролируется слоистостью (рис. 1а). Нередко эта тонкодисперсная форма агрегирована в виде послойных линзовидных скоплений (рис. 1б) или микрогнезд обогащенных микрогранобластовым кварцевым материалом (рис. 1в). Здесь сульфиды укрупняются с образованием на порядок более крупнозернистых кварц-сульфидных микролинз или микрогнезд, вероятно метаморфогенной природы. Некоторые микрогнезда сульфидов имеют типичную оторочку кварца, с реликтовой стебельчатой структурой, как на месторождении Сухой Лог.

В некоторых случаях в сланцах отмечается карбонатизация. Она проявлена в выделении метасоматического железистого карбоната (сидероплезиты) в виде бурых неправильных уплощенных микрогнезд (рис. 1г) и метакристаллов. Содержание железистого карбоната может составлять до 10-15% площади шлифа. Местами карбонатизация проявлена в виде наложения прожилковой и гнездовой минерализации безжелезистого карбоната. В некоторых углеродистых сланцах отмечено развитие турмалина в «теньях давления» вокруг сульфидных сегрегаций.

Другой формой сульфидизации служат выделения типичных метакристаллов или их сростков. Метакристаллы пирита нередко имеют карбонат-кварцевую

оторочку. Размер метакристаллов квадратных и скошенных сечений достигает 0,2-0,5 мм, реже до 1 мм (рис. 1д). Наиболее полно метакристаллы сульфидов встречаются в сланцах, затронутых метасоматозом, где первые формы уже практически отсутствуют, вероятно, в связи с ремобилизацией вещества в условиях метаморфизма.

Судя по распределению в породном матриксе и присутствию переходных форм, основная масса сульфидов имеет исходно осадочно-диагенетическое происхождение с перераспределением и, возможно, дополнительным формированием на стадии катагенеза и метаморфизма с проявлением сегрегационной дифференциации вещества. В сланцах присутствуют и типично гидротермальные формы выделения сульфидов, которые отмечаются в составе секущих нитевидных мономинеральных пиритовых, карбонат-кварцевых и хлорит-карбонат-кварцевых прожилков (рис. 1е), происхождение которых может быть связано с метаморфизмом или метасоматозом.

Гидротермально-метасоматические изменения сланцев проявляются в альбитизации и биотитизации (рис. 2). Порода из углеродистого сланца практически превращается в метасоматит альбит-кварц-биотит-серицитового состава с небольшим количеством (1-2%) углеродистого вещества и примесью сульфидов (до 1-2%). Для породы характерна сланцеватая, участками очковая текстура. На фоне основной ткани здесь выделяются относительно более крупные линзовидные (очковые) выделения и порфиробласты альбита (рис. 2а) и коричневого биотита (рис. 2б). Такое явление обнаружено нами ранее для золотоносных черносланцевых комплексов

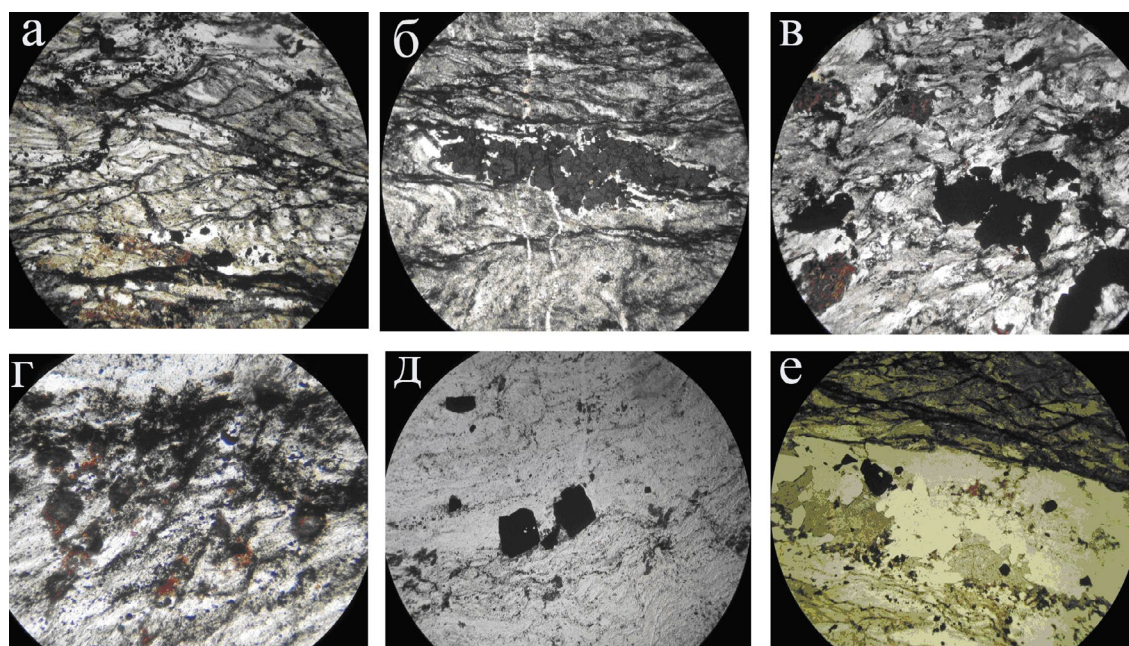


Рис. 1. Сульфидная минерализация в углеродистых сланцах: а) контролируемая слоистостью рассеянная вкрапленность сульфидов; б) послойное линзовидное скопление сульфидов; в) метаморфогенное гнездовое выделение кварцево-сульфидного состава; г) ромбовидные метакристаллы железистого карбоната (бурое); д) метакристаллы сульфидов; е) вкрапленность и гнезда сульфидов в сегрегационном кварцевом прожилке /

Fig. 1. Sulfide mineralization in carbonaceous shales: a) stratified dispersed inclusions of sulfides; b) layered lenticular accumulation of sulfides; c) metamorphogenic nesting of quartz-sulfide composition; d) diamond-shaped metacrystals of ferruginous carbonate (brown); e) sulfide metacrystals; f) inclusions and nests of sulfides in a segregated quartz vein

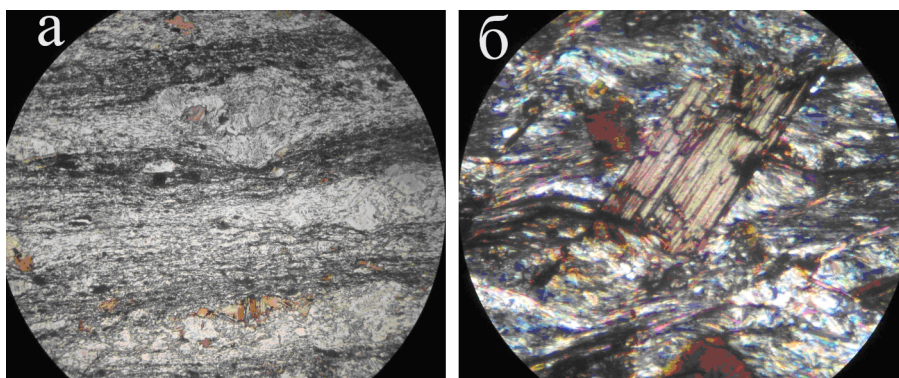


Рис. 2. Гидротермально-метасоматически измененные углеродистые сланцы: а) альбитизация с порфиробластами и очковыми выделениями альбита; б) биотитизация с порфиробластами биотита (никולי скрещены) /

Fig. 2. Hydrothermal-metasomatically altered carbonaceous shales: a) albitization with porphyroblasts and spectacled albite secretions; b) biotitization with porphyroblasts of biotite (nicoli crossed)



Рис. 3. Коренное обнажение дислоцированного участка потенциально золотоносной минерализации кварцево-жильно-прожилкового типа в углеродистых филлитах малкинской свиты. Левый борт долины р. Хасаут /

Fig. 3. Root outcrop of a dislocated site of potentially gold-bearing mineralization of quartz-vein-veined type in carbonaceous phyllites of the Malkin formation. The left side of the valley of the Khasaut river

Амура-Охотской области [Парада, 2002]. В затронутых метасоматозом сланцах сульфидизация проявляется преимущественно в виде метакристаллов.

Кварцево-жильно-прожилковый тип

Потенциально продуктивная на золото кварцево-жильно-прожилковая минерализация распространена значительно шире, чем сульфидно-вкрапленная. Выделяются следующие виды прожилков: кварцевые убогосульфидные и малосульфидные, кварц-полевошпатовые малосульфидные, друзитовые кварц-карбонатные, нитевидные кварц-карбонатные. Скопления сближенных жил и прожилков в углеродистых сланцах образуют субсогласные штокверки, часто подверженные более поздним дислокациям (рис. 3).

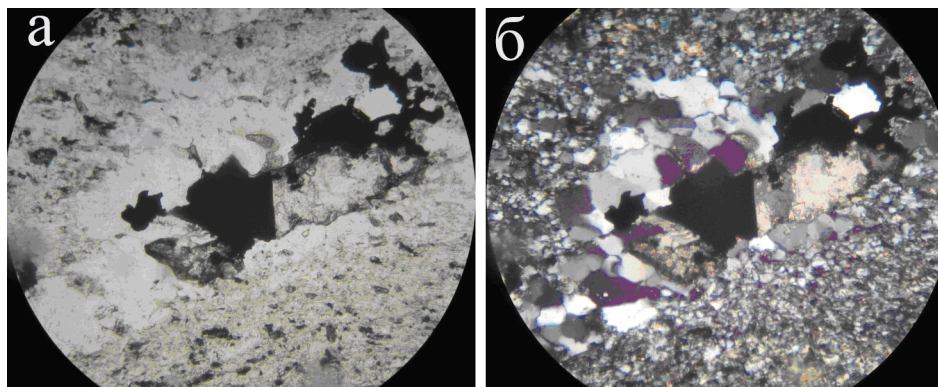


Рис. 4. Кварцевый прожилок с включениями сульфидов и железистых карбонатов в углеродистом сланце: а) николи параллельны; б) николи скрещены /

Fig. 4. Quartz veins with inclusions of sulfides and ferruginous carbonates in carbonaceous shale: a) the nichols are parallel; b) the nichols are crossed

Наиболее распространены разно ориентированные кварцевые и кварц-полевошпатовые малосульфидные и убогосульфидные прожилки и жилы. Сложены они полупрозрачным и молочно-белым крупнозернистым трещиноватым кварцем и содержат небольшое (0,5-2%) количество сульфидов (пирит, халькопирит, реже галенит и др.). Иногда в них отмечают железо-магниевого карбонаты (рис. 4а, б). В пробах-протоловках отмечается самородное золото. Содержания золота в отдельных прожилках по непроверенным данным предшественников достигают 100 г/т.

Кварц-карбонатные прожилки распространены в основном в слабо углеродистых сланцах, а также в породах основного состава. Они также как и кварцевые прожилки разно ориентированные. Прожилки до 1 см мощностью часто имеют зональное строение. Центральная часть их выполнена кварцем иногда друзитового строения, периферия выражена железисто-карбонатной каемкой. Иногда кварца совсем мало и тогда центральная их зона выполнена крупнозернистыми агрегатами кальцита с тонкой каемкой магнезиально-железистого карбоната. Пирит приурочен к железистому карбонату.

Разно ориентированные нитевидные кварц-карбонатные прожилки, как правило, сопровождаются линзочками и просечками пирита. При выветривании придают породе от кремовой до светло коричневой окраску.

В составе секущих кварцевых, кварц-полевошпатовых и карбонат-кварцевых прожилков отмечаются типично гидротермальные формы выделения сульфидов. В этом случае, кроме пирита, отмечаются халькопирит и сфалерит, а также самородное золото (рис. 5). В одном случае нами обнаружено очень мелкое зерно самородной платины.

Джаспероиды

Прослои и линзы потенциально золотоносных джаспероидов в ММРУ диагностированы нами впервые. Они развиты в пачке углеродистых сланцев в ассоциации с линзовидно-послойными сериями кварцевых жил и прожилков.

Джаспероиды ММРУ избирательно развиваются по слоям и линзам карбонатных пород в составе толщи углеродистых филлитов и филлитовидных сланцев.

Текстура джасперодов реликтовая слоистая. Структура породы микрогранобластовая. Основную ткань породы составляет тонкозернистый мозаичный агрегат

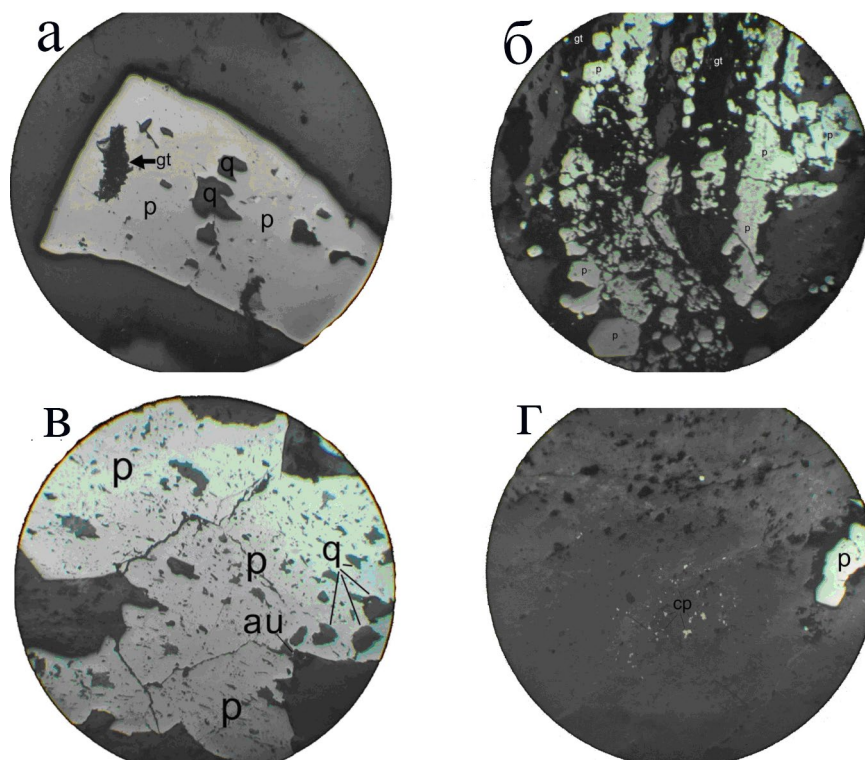


Рис. 5. Формы выделения рудных минералов в кварцевых жилах и прожилках: а) метакристалл пирита с включениями гетита; б) катаклазированный пирит; в) тонкая чешуйка самородного золота размером $<0,01$ мм на контакте с зерном пирита; г) рассеянная вкрапленность халькопирита в кварце /

Fig. 5. Forms of ore minerals separation in quartz veins and veins: a) pyrite metacrystal with goethite inclusions; b) cataclasized pyrite; c) a thin flake of native gold <0.01 mm in size on contact with a pyrite grain; d) scattered chalcopyrite inclusions in quartz

кварца с гнездами и прожилками карбоната и мелкой сыпью рудного минерала (рис. 6а). Рудный минерал (пирит) распределен в породе крайне неравномерно в виде сыпи мелких кубических кристаллов, нередко собранных в густые «струи» (рис. 6б). Местами отмечаются более крупные метакристаллы. В джаспероидах с реликтовой слоистостью рудный минерал выделяется в виде рассредоточенных мелких субизометричных зерен и их сростков, распределенных по полосчатости.

В составе джаспероидов могут принимать участие в качестве второстепенных минералов также биотит, актинолит, минералы эпидотовой группы, серицит и плагиоклаз.

Кварц представлен, как правило, двумя генерациями. Ранний кварц образует зерна размером сотые доли мм, составляющие общий фон породы. Кварц второй, более поздней генерации, имеет размеры в десятые доли и первые мм, выделяясь в виде более раскристаллизованных линзочек, а также кварц-карбонатных прожилков.

Реликтовая слоистость в породе выражена в различном минеральном составе и зернистости породы. Микрослойки выделяются по различному соотношению темноцветных и светлоокрашенных минералов, распределению рудного минерала.

В некоторых шлифах структура тонкозернистая микронематогранобластовая за счет присутствия биотита (до 10%), мелкой тонкозернистой сыпи минералов цои-

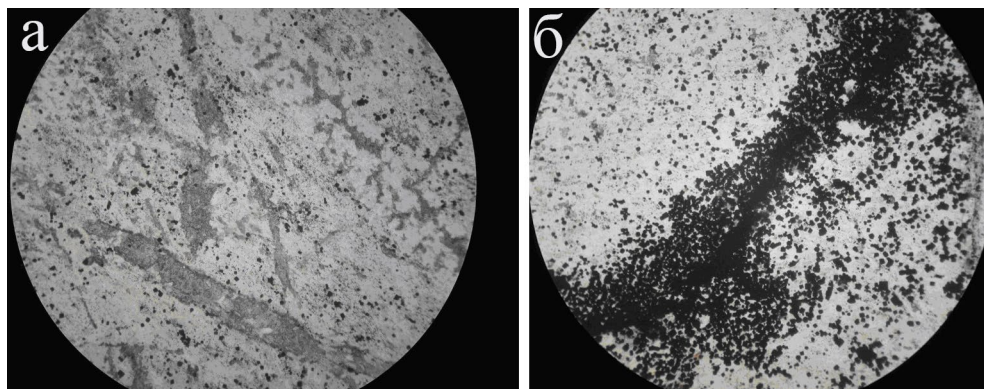


Рис. 6. Джаспероиды: а) тонкозернистый мозаичный агрегат кварца с гнездами и прожилками карбоната и мелкой сыпью рудного минерала; 2) скопление кубических кристаллов пирита в джаспероиде /

Fig. 6. Jasperoids: a) fine-grained mosaic aggregate of quartz with nests and veins of carbonate and a fine rash of ore mineral; 2) accumulation of cubic pyrite crystals in jasperoid

зит-эпидотовой группы (до 17%), призмочек актинолита (до 8%), мелких чешуек серицита, которые заметно укрупняются среди выделений кварца второй генерации. Отмечаются также редкие зерна полисинтетически сдвойникового кислого плагиоклаза. Биотит в шлифе имеет изометричную форму, характерную для роговиковой структуры. Актинолит наблюдается в виде мелких призмочек, ориентированных субсогласно полосчатости и более крупных, расщепляющихся на концах, удлиненно призматических кристаллов, ориентированных субперпендикулярно к полосчатости.

Джаспероиды обычно рассматриваются как потенциально золотоносные образования. Такими образованиями сложены рудные тела месторождения Карлин в США [Large et al., 2011]. Открытие джаспероидов в черносланцевых толщах Малка-Муштинского рудного узла повышает его перспективы на обнаружение золотого оруденения карлинского типа.

Выводы

1. Установлена приуроченность потенциально золотоносных минерализаций ММРУ к верхнепротерозойским углеродистым породам верхов малкинской свиты. По морфологии и вещественному составу выделено три основных минерально-морфологических типа таких минерализаций: сульфидно-вкрапленный, кварцево-жильно-прожилковый и джаспероидный. Первые два типа избирательно развиваются по углеродистым филлитам и филлитовидным сланцам верхней части малкинской свиты, джаспероиды – по карбонатным прослоям в углеродистых породах.

2. В составе сульфидно-вкрапленного типа по морфологии и происхождению выделены три разновидности сульфидной минерализации: 1) рассеянная в углеродистых сланцах вкрапленность осадочно-диагенетических сульфидов (преимущественно пирита); 2) сульфидно-кварцевые линзовидные обособления катагенетического и (или) метаморфогенного происхождения; 3) выделения типичных метакристаллов или их сростков, образование которых связано с поздними гидротермально-метасоматическими процессами.

3. Кварцево-жильно-прожилковый тип минерализации имеет значительно более широкое распространение, чем сульфидно-вкрапленный или джаспероидный.

Он представлен скоплениями сближенных однообразно- и (или) разно ориентированных убогосульфидных и малосульфидных жил и прожилков преимущественно кварцевого и кварц-полевошпатового состава в углеродистых сланцах, образующих в совокупности субсогласные штокверки, часто подверженные более поздним дислокациям.

4. Впервые на территории ММРУ в составе черносланцевой толщи верхней части малкинской свиты выявлены прослои и линзы джаспероидов (гидротермально окварцованных известняков), несущих тонко вкрапленную сульфидную минерализацию, преимущественно пиритового состава.

Литература

1. Буряк В. А. Метаморфогенно-гидротермальный тип золотого оруденения. // Геология рудных месторождений. – 1975. – Т. 18. № 2. – С. 15-26.
2. Гарьковец В. Г. О выделении углеродисто-рудной формации (на примере Южного Тянь-Шаня). // Узб. геол. журн. – 1976. – № 5. – С. 17-21.
3. Гурбанов А. Г., Докучаев А. Я., Газеев В. М., Гурбанова О. А. Аномально высокие содержания благородных металлов в отходах фиагдонской обогатительной фабрики: возможный новый для северного кавказа золото-платиноидный с полиметаллами тип оруденения, локализованный в ранне-среднеюрских черных сланцах. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11 (2). – С. 6-21. DOI: 10.46698/VNC.2021.41.26.001
4. Иванкин П. Ф., Назарова Н. И. Методика изучения рудоносных структур в терригенных толщах. – М.: Недра, 1988. – 253с
5. Кокин А. В. Новые данные по золотоносности осадочных пород Юго-Восточного обрамления Сибирской платформы. // Доклады АН СССР. – 1990. – Т. 13. № 3. – С. 697-699.
6. Кряжев С. Г. Изотопно-геохимические и генетические модели золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах // Отечественная геология. – 2017. – № 1. – С. 28-38.
7. Курбанов Н. К., Арифуров Ч. Х., Ехиванов В. А., Романов В. И. Полигенно-полихронные золоторудные месторождения терригенных комплексов. // Руды и металлы. – 1992. – Стартовый номер. – С. 54-61.
8. Парада С. Г. О литогенной природе некоторых золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах. // Литология и полезные ископаемые. – 2002. – № 3. – С. 275-288.
9. 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
10. Сидоров А. А., Томсон И. Н. Условия образования сульфидизированных черносланцевых толщ и их металлогеническое значение. // Тихоокеан. геология. – 2000. – Т. 19. № 1. – С. 37-49.
11. Фогельман Н. А., Константинов М. М., Курбанов Н. К. Принципы систематики золоторудных месторождений для прогноза и поиска. // Отечественная геология. – 1995. – № 3. – С. 31-41.
12. Чернышев И. В., Бортников Н. С., Чугаев А. В., Гамянин Г. Н., Бахарев А. Г. Источники металлов крупного орогенного золоторудного Неждановского месторождения (Якутия, Россия): результаты высокоточного изучения изотопного состава свинца (MC-ICP-MS) и стронция. // Геология руд. месторождений. – 2011. – Т. 52. № 5. – С. 395-418.
13. Aristov V. V. Spatial regularities of localization of gold ore occurrences in the Yana – Kolyma province. // Russian Geology and Geophysics. – 2019. – Vol. 60. No. 8. – pp. 876-889.
14. 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.

15. Goldfarb R. J., Groves D. I. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. // *Lithos*. – 2015. – No. 233. – pp. 2-26.
16. Graupner T., Niedermann S., Kempe U., Klemm R., Bechtel A. Origin of ore fluids in the Muruntau gold system: constraints from noble gas, carbon isotope and halogen data. // *Geochim. Cosmochim. Acta*. – 2006. – Vol. 70. – pp. 5356-5370.
17. Groves D. I., Goldfarb R. J., Robert F., Hart C. J. R. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. // *Econ. Geol.* – 2003. – Vol. 98. – pp. 1-29.
18. Hagemann S. G., Cassidy K. F. Archean orogenic lode gold deposit. // *Rev. Econ. Geol.* – 2000. – Vol. 13. – pp. 9-68.
19. Lang J. R., Baker T. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding. // *Mineral. Deposita*. – 2001. – Vol. 36. – pp. 477-489.
20. Large R. R., Bull S. W., Maslennikov V. V. A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. // *Econ. Geol.* – 2011. – Vol. 106. – pp. 331-358.
21. Pirajno F. Hydrothermal processes and mineral systems / Geological Survey of Western Australia. – London: Springer, 2009. – 1250 p.
22. Voisey C. R., Willis D., Tomkins A. G., Wilson C. J. L., Micklethwaite S., Salvamin F., Bougoure J., Rickard W. D. A. Aseismic refinement of orogenic gold systems. // *Econ. Geol.* – 2020. – Vol. 115. No. 1. – pp. 33-50.

References

1. Buryak V. A. Metamorphogenic-hydrothermal type of gold mineralization. *Geology of ore deposits*. 1975. Vol. 18. No. 2. pp. 15-26. (In Russ.)
2. Garkovets V. G. On the identification of a carbonaceous-ore formation (on the example of the Southern Tien Shan. *Uzbek geological journal*. 1976. No. 5. pp. 17-21. (In Russ.)
3. Gurbanov A. G., Dokuchaev A. Ya., Gazeev V. M., Gurbanova O. A. Abnormally high content of noble metals in wastes of the Fiagdon concentration plant: a possible new type of mineralization for the North Caucasus is gold-platinoid with base metals, localized in the Early-Middle Jurassic black shales. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11 (2). pp. 6-21. DOI: 10.46698/VNC.2021.41.26.001. (in Russ.)
4. Ivankin P. F., Nazarova N. I. Method for studying ore-bearing structures in terrigenous strata. Moscow. Nedra. 1988. 253 p. (In Russ.)
5. Kokin A. V. New data on the gold content of sedimentary rocks of the South-Eastern framing of the Siberian platform. *Doklady Akademii Nauk of the USSR*. 1990. Vol. 13. No. 3. pp. 697-699. (In Russ.)
6. Kryazhev S. G. Isotope-geochemical and genetic models of gold deposits in carbonaceous terrigenous strata. *Russian geology*. 2017. No. 1. pp. 28-38. (In Russ.)
7. Kurbanov N. K., Arifulov Ch. Kh., Ekhivanov V. A., Romanov V. I. Polygenic-polychronous gold deposits of terrigenous complexes. *Ores and metals*. 1992. St. No. pp. 54-61. (In Russ.)
8. Parada S. G. On the lithogenic nature of some gold deposits in carbonaceous-terrigenous strata. *Lithology and minerals*. 2002. No. 3. pp. 275-288. (In Russ.)
9. Parada S. G., Hamburg K. Yu. Problems of Analytical Determination of Precious metals in Black shale rocks of Southern Russia. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12 (3). pp. 119-132. DOI: 10.46698/VNC.2022.23.74.008. (In Russ.)
10. Sidorov A. A., Thomson I. N. Conditions for the formation of sulfidized black shale strata and their metallogenic significance. *Pacific geology*. 2000. Vol. 19. No. 1. pp. 37-49. (In Russ.)
11. Fogelman N. A., Konstantinov M. M., Kurbanov N. K. Principles of taxonomy of gold deposits for forecasting and prospecting. *Russian geology*. 1995. No. 3. pp. 31-41. (In Russ.)
12. Chernyshev I. V., Bortnikov N. S., Chugaev A. V., Gamyagin G. N., Bakharev A. G. Sources of metals in the large orogenic gold ore Nezhdaninskoye deposit (Yakutia, Russia): results of a high-precision study of the isotopic composition of lead (MC-ICP-MS) and strontium. *Geology of ore deposits*. 2011. Vol. 52. No. 5. pp. 395-418. (In Russ.)

13. Aristov V.V. Spatial regularities of localization of gold ore occurrences in the Yana – Kolyma province. *Russian Geology and Geophysics*. 2019. Vol. 60. No. 8. pp. 876-889.
14. 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.
15. Goldfarb R. J., Groves D. I. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*. 2015. No. 233. pp. 2-26.
16. Graupner T., Niedermann S., Kempe U., Klemm R., Bechtel A. Origin of ore fluids in the Muruntau gold system: constraints from noble gas, carbon isotope and halogen data. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2006. Vol. 70. pp. 5356-5370.
17. Groves D. I., Goldfarb R. J., Robert F., Hart C. J. R. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Econ. Geol.* 2003. Vol. 98. pp. 1-29.
18. Hagemann S.G., Cassidy K.F. Archean orogenic lode gold deposit. *Rev. Econ. Geol.* 2000. Vol. 13. pp. 9-68.
19. Lang J. R., Baker T. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding. // *Mineral. Deposita*. 2001. Vol. 36. pp. 477-489.
20. Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. *Econ. Geol.* 2011. Vol. 106. pp. 331-358.
21. Pirajno F. Hydrothermal processes and mineral systems. *Geological Survey of Western Australia*. London, Springer. 2009. 1250 p.
22. Voisey C. R., Willis D., Tomkins A. G., Wilson C. J. L., Micklethwaite S., Salvamin F., Bougoure J., Rickard W. D. A. Aseismic refinement of orogenic gold systems. *Econ. Geol.* 2020. Vol. 115. No. 1. pp. 33-50.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК: 553.5; 691.42; 691.43

DOI: [10.46698/VNC.2022.71.95.011](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.71.95.011)

Оригинальная статья

Цеолитсодержащие кремнистые породы
Дагестана как добавка для получения
керамической волластонитсодержащей
облицовочной плиткиА. Р. Юсупов , С. А. Мамаев , З. А. Юсупов , А. С. Мамаев Институт геологии Дагестанского научного центра РАН, Россия, 367010, Республика
Дагестан, г. Махачкала, ул. Ярагского, 75, e-mail: dangeogis@mail.ru

Статья поступила: 29.09.2022, доработана: 26.10.2022, одобрена в печать: 04.11.2022

Резюме: **Актуальность работы.** Широкое распространение на территории Республики Дагестан имеют *кремнисто – карбонатные породы*, в которых суммарное содержание цеолитов и опал-кристобалит-тридимитовой фазы (ОКТ) превышает 45%, а содержание кальцита выше 30%. Породы, слагающие полезную толщу (по крайней мере, ее большую часть), литологически соответствуют известнякам опоконидным и сильнокремнеземистым, цеолитсодержащим (10-15% цеолитов) и цеолитовым (40% и более), слабоокварцованным и слабоглинистым. Однако от чистых известняков их отличает низкое значение собственно кальцитово-карбонатной части – зачастую менее 50%. Цеолитсодержащие породы пригодны для использования в качестве добавки в монтмориллонитсодержащую глину для получения керамики и улучшения ее физико-механических свойств. Эти породы также можно использовать как добавка в портландцемент. Это позволит повысить качество цемента и сэкономить клинкер. Минерально-сырьевая база кремнистых цеолитсодержащих пород Дагестана позволит создать крупные комплексы по добыче и переработке данных пород. **Цель исследования.** Целью наших исследований является рассмотрение цеолитсодержащих кремнистых пород, как сырья для производства строительных материалов, в соответствии с результатами лабораторно-технологических исследований. Данные породы также можно использовать для получения волластонитсодержащей керамики. **Методы исследований.** Для исследуемого сырья определялись следующие характеристики: пластичность, спекаемость, общая усадка, водопоглощение, прочность при сжатии и изгибе. Методом рентгенографического фазового анализа определялся минеральный состав образцов. Аналитические работы по изучению исследуемых пород выполнены ФГУП «ЦНИИгеолнеруд». **Результаты исследований.** Результаты исследования сырья проб №№ 2, 3 и 4 показали, что оно может применяться в качестве технологической добавки при производстве керамического кирпича методом пластического формования. Добавка в глину Дарвагчайского месторождения цеолитсодержащих пород позволяет устранить явление вспучивания и двухкомпонентные смеси классифицируются как сильно-спекающееся сырье. С увеличением содержания (с 10 до 30%) исследуемых технологических добавок прочность образцов при изгибе возрастает, прочность при сжатии снижается, воздушная и общая усадка уменьшаются, водопоглощение увеличивается. Комплекс данных минералов способствует интенсификации спекания и образованию более пористой структуры керамического черепка.

Ключевые слова. Цеолиты, цеолитсодержащие породы, кремнистые породы, кальцит, глина, опал-кристобалит-тридимит, керамическая плитка, Дагестан, Леваша, Рубасчай.

Благодарности: Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГ ДФИЦ РАН по темам НИР Рег. номера НИОКТР 1021060808460-6-1.5.6 и 1021060808457-2-1.5.6.

Для цитирования: Юсупов А. Р., Мамаев С. А., Юсупов З. А., Мамаев А. С. Цеолитсодержащие кремнистые породы Дагестана как добавка для получения керамической волластонитсодержащей облицовочной плитки. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (4): 142-152. DOI: 10.46698/VNC.2022.71.95.011.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION
OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY

DOI: [10.46698/VNC.2022.71.95.011](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.71.95.011)

Original article

Zeolite-containing siliceous rocks of Dagestan as an additive for obtaining ceramic wollastonite-containing facing tiles

A. R. Yusupov , S. A. Mamaev , Z. A. Yusupov , A. S. Mamaev 

Institute of Geology, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 75
Yaragsky Str., Makhachkala 367010, Republic of Dagestan, Russian Federation,
e-mail: dangeogis@mail.ru

Received: 29.09.2022, revised: 26.10.2022, accepted: 04.11.2022

Abstract: Relevance. Siliceous-carbonate rocks are widespread in the territory of the Republic of Dagestan, in which the total content of zeolites and opal-cristobalite-tridymite phase (OCT) exceeds 45%, and the calcite content is above 30%. The rocks that make up the useful stratum (at least most of it) lithologically correspond to opoka-like and highly silicic limestones, zeolite-containing (10-15% zeolites) and zeolite (40% or more), weakly silicified and slightly clayey. However, they are distinguished from pure limestones by the low value of the actual calcite part – often less than 50%. Zeolite-containing rocks are suitable for use as an additive in montmorillonite-containing clay to obtain ceramics and improve its physical and mechanical properties. These rocks are also suitable for addition to Portland cement, which will save cement clinker during production and improve the quality of cement. The calculated predictive resources, their laboratory and technological properties indicate the possibility of creating a solid mineral resource base and building large complexes for the extraction and processing of zeolites and siliceous rocks in the Levashinsky and Tabasaran regions of the Republic of Dagestan.

Aim. The purpose of our research is to consider zeolite-containing siliceous rocks as a raw material for the production of building materials, in accordance with the results of laboratory and technological studies. For the first time, these rocks of Dagestan are considered by us as a raw material for obtaining ceramics. **Methods.** For the studied raw materials, the following characteristics were determined: plasticity, sintering, general shrinkage, water absorption, compressive and bending strength. The mineral composition of the samples was determined by X-ray phase analysis. Analytical studies of zeolite-containing and overburden rocks (X-ray quantitative phase analysis; chemical analysis with the determination of amorphous SiO₂; differential thermal analysis and laboratory and technological tests were carried out by the Federal State Unitary Enterprise “TsNIIgeolnerud”. **Results.** The results of the study of raw materials samples No. 2, 3 and 4 showed that it can be used as a technological additive in the production of ceramic bricks by plastic molding. The addition of zeolite-containing rocks to the clay of the Darvagchay deposit makes it possible to eliminate the phenomenon of swelling and two-component mixtures are classified as highly caking raw materials. With an increase in the content (from 10 to 30%) of the studied technological additives, the bending strength of the samples increases, the compressive strength decreases, air and total shrinkage decrease, and water absorption increases. The complex of these minerals contributes to the intensification of sintering and the formation of a more porous structure of the ceramic shard.

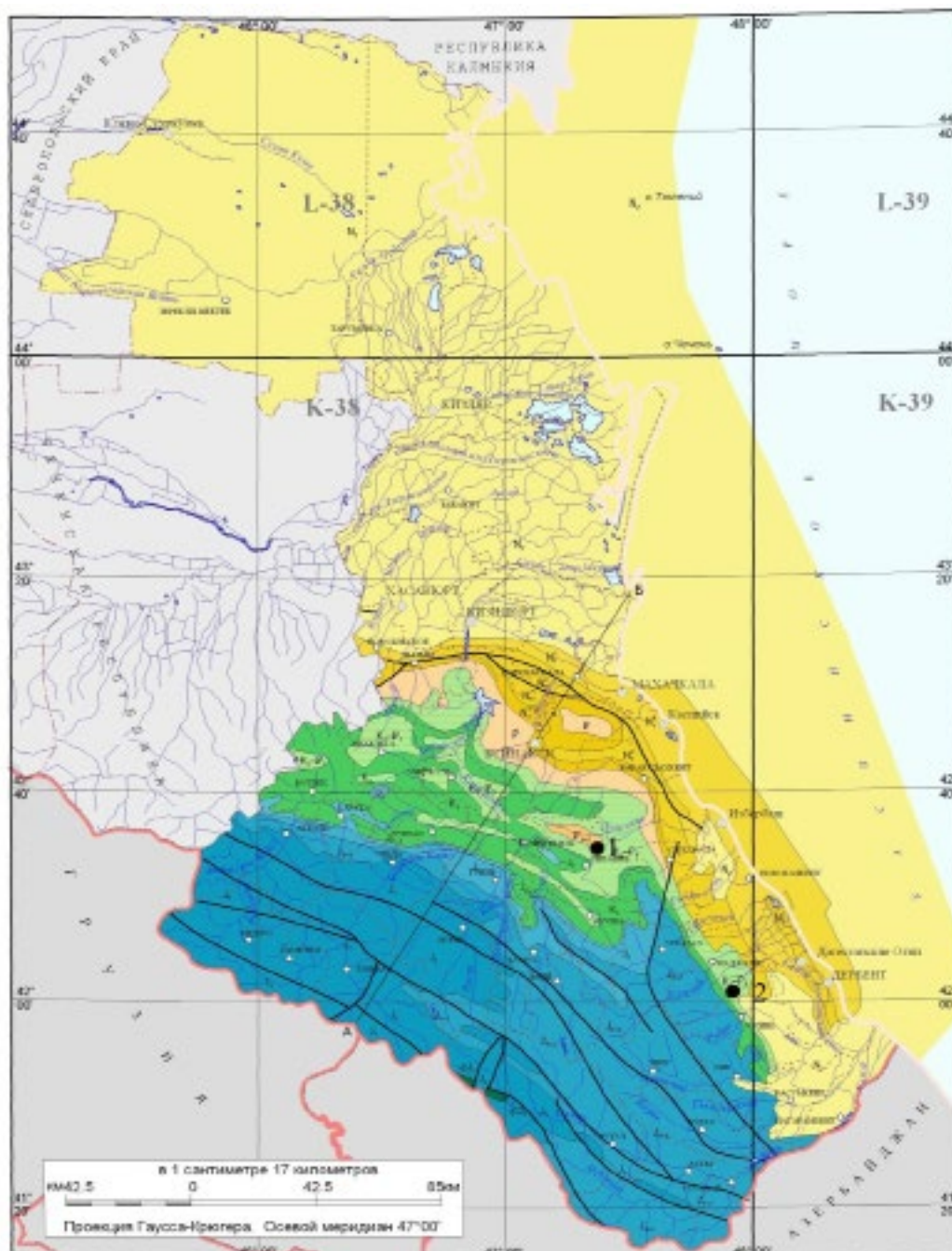
Keywords: Zeolites, zeolite-containing rocks, siliceous rocks, calcite, clay, opal-cristobalite-tridymite, ceramic tiles, Dagestan, Levashi, Rubashchai.

Acknowledgments: The article was prepared within the framework of the state task of the IG DFRC RAS on the topics of R&D Reg. NIOKTR numbers 1021060808460-6-1.5.6 and 1021060808457-2-1.5.6.

For citation: Yusupov A. R., Mamaev S. A., Yusupov Z. A., Mamaev A. S. Zeolite-containing siliceous rocks of Dagestan as an additive for the production of ceramic wollastonite-containing facing tiles. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (4): 142-152. DOI:10.46698/VNC.2022.71.95.011.

Введение

Кремнистые цеолитсодержащие породы находят новые области применения в современных условиях строительства разных объектов и сооружений. [Талпа и др., 1992; Хардигов и др., 1992; Sandberg, 2007; Perezetal., 2007]. Разные компании, использующие цеолитсодержащее сырье, разрабатывают различные методы переработки для многих видов цеолитовой продукции. [Конюхова, Дистанов, 2000; Хардигов, 2005; Юсупов и др., 2015; Grecnouq, 1953].



- 1 участок Леваши / Levashisite; ● 2 Участок Дюбек / Dubek site

Рис. 1. Геологическая карта Дагестана /

Fig. 1. Geological map of Dagestan

Опал-кристобалит-тридимитовая фаза наряду с цеолитами являются природными сорбентами и характеризуются физико-химическими свойствами, которые существенно дополняют и расширяют спектр физико-химических показателей породы и, в конечном итоге, определяют различные свойства цеолитового сырья для его применения во многих областях [Куковский, 1966; Udinetal., 1949; Gresnouq, 1953].

Применение кремнистых цеолитсодержащих пород для производства керамики основано в измельчении этих пород совместно с глинами различного состава и дальнейшей термической обработке [Зальман, 1959; Мороз, 1972; Наумов и др., 1969; Павлов, 1972; Роговой, 1974; Черняк, Мороз, 1979; Unlandetal., 2003].

Цель работы. Территория Северного Кавказа в частности Республики Дагестан в современных условиях актуальна для создания мощной минерально-сырьевой базы цеолитсодержащих пород [Гусейханов и др., 2016; Талпа и др., 1992; Тотурбиев и др., 2018, 2022; Хардилов, 2005; Хардилов и др., 1992].

Целью данной работы является изучение кремнистых цеолитсодержащих пород опал-кристобалит-тридимитового (ОКТ) состава с содержанием цеолитов (10-50%), для получения волластонитсодержащей керамики, путем добавления их в монтмориллонитсодержащую глину. Данные породы развиты на Левашинском и Рубасчайском участках Республики Дагестан (РД) (рис. 1) [Хардилов и др., 1992; Юсупов и др., 2015]. При растущем строительстве в современных условиях, эти породы могут найти широкое применение.

Методы исследования

Работы по получению облицовочной плитки, отвечающей требованиям ГОСТ 6141-91 «Плитки керамические глазурованные для внутренней облицовки стен», ГОСТ 6787-2001 «Плитки керамические для полов. Технические условия», ГОСТ 13996-93 [Конюхова, Дистанов, 2000; Роговой, 1974] «Плитки керамические фасадные и ковры из них», проводились на материале проб №№ 2, 3, 4. В связи с этим испытания проводились в варианте возможного использования этих пород в качестве добавки в керамическую шихту для облицовочной керамики. В качестве глинистого компонента в шихту добавлялась среднепластичная полиминеральная глина Дарвагчайского месторождения Республики Дагестан.

Для исследуемого сырья (лабораторно-технологическая проба № 1) определялись следующие характеристики: пластичность, спекаемость, общая усадка, водопоглощение, прочность при сжатии и изгибе. Результаты исследований приведены в таблицах 1-4.

По степени пластичности проба относится к группе среднепластичного глинистого сырья. В зависимости от степени спекания проба относится к группе сильноспекающегося глинистого сырья [Куковский, 1966; Наумов и др., 1969; Черняк, Мороз, 1979].

Для проведения керамических испытаний методом полусухого прессования формовались лабораторные образцы (балочки размером 150x40x40 мм) с использованием полусухой схемы подготовки пресспорошка. Высушенное глинистое сырье измельчали на дробилке и из него на лабораторных бегунах готовили пресспорошок, состоящий примерно из 50% фракции 2,5-1 мм и 50% фракции менее 1,25 мм. Влажность пресспорошка составляла 16,4%. Для усреднения влажности пресспорошок выдерживался в течение 1-2 суток. Давление прессования равнялось 25 МПа.

Таблица 1 / Table 1.

Пластичность глинистого сырья / Plasticity of clayraw materials

Пределы пластичности / Plasticlimits		Число пластичности / Plasticity number	Классификация глинистого сырья по числу пластичности / Classification of clay raw materials according to plasticity number
Нижняя граница текучести / Loweryield point	Граница раскатывания / Rolling border		
44	27,6	16,4	Среднепластичное / Mediumplastic

Таблица 2 / Table 2.

Спекаемость глинистого сырья / Caking capacity of clay raw materials

Наименование показателей / The name of indicators	Температура обжига, °C / Firing temperature, °C					Наименование группы глинистого сырья в зависимости от степени спекания / Name of the group of clay raw materials depending on the degree of sintering
	950	1000	1050	1100	1150	
Водопоглощение, % / Waterabsorption, %	22,53	22,55	23,09	19,98	0,60	Сильно спекающееся / Stronglycaking
Средняя плотность, г/см ³ / Averagedensity, g/cm ³	1,51	1,51	1,50	1,57	2,08	

Таблица 3 / Table 3.

Описание образцов после обжига / Description of samples after firing

Характеристика образцов / Sample characteristics			
Цвет / Color	Звук/ Sound	Наличие включений / Inclusions	Другие дефекты / Other defects
Оранжево-розовый / Orange-pink	Глухой / Muted	Небольшое включение белого и серого цвета / Slight inclusion of white and gray	Нет / None

Таблица 4 / Table 4.

Физико-механические свойства обожженных образцов (t° обж. – 1000°C) / Physico-mechanical properties of fired samples (to fired – 1000 ° C)

Общая линейная усадка, % / Total linear shrinkage, %	Водопоглощение, % / Waterabsorption, %	Прочность, МПа / Strength, MPa	
		При сжатии / In compression	При изгибе / Bending
4,7	20,6	29,3	6,8

Было отформовано: 1) 10 балочек размером 160x40x40 мм для определения пределов прочности при сжатии и изгибе, водопоглощения и общей усадки; 2) 15 плиток размером 60x30x10 мм для определения спекаемости.

Сушка образцов осуществлялась в помещении лаборатории на стеллажах, затем в сушильном шкафу при температуре 35-105°C.

Обжиг лабораторных образцов проводился при температуре 1000°C в электропечи типа СНОЛ 12/16. Режим обжига: а) подъем температуры от 100 до 250°C, от 250 до 400°C – 2 часа, от 400 до 870°C – 15 часов, от 870 до 1000°C – 3 часа, б) выдержка при конечной температуре – 3 часа; в) охлаждение до 50-60°C – 24 часа.

Обожженные образцы имеют удовлетворительный внешний вид. Общая усадка равна 4,7%, водопоглощение – 20,6%, прочность при сжатии – 29,3МПа, прочность при изгибе – 6,8МПа. Достаточно высокие значения прочностных характеристик позволяют прогнозировать получение стандартного керамического кирпича марки не менее «125».

Методом рентгенографического фазового анализа установлено, что в результате высокотемпературной обработки в керамическом черепке образуются следующие минеральные фазы: модификации диоксида кремния (β – кристобалит – основная фаза, тридимит, кварц) – 54%, волластонит – 36%, минерал из группы акерманит – геленит – 10%.

Результаты работы и их обсуждение

Цеолитсодержащая порода исследовалась как технологическая добавка при получении керамического кирпича способом пластического формования. В полиминеральную кирпичную глину Дарвагчайского месторождения Республики Дагестан порода вводилась в количестве 10, 20 и 30%.

Глина Дарвагчайского месторождения имеет следующий химический состав: SiO_2 –64,62% (в том числе кварца 27,91%), Al_2O_3 –13,60%, Fe_2O_3 –5,59%, CaO –2,61%, MgO –2,05%, Na_2O –1,20%, K_2O –1,82%, SO_3 –0,07%, ппп – 6,92%. Содержание монтмориллонитового компонента составляет 35%. Глина является умереннопластичной (число пластичности равно 14,0), среднedisперсной (содержание частиц размером менее 1 мкм составляет 46,1%), высокочувствительной к сушке.

Лабораторные образцы-балочки размером 160x40x40 мм формовались путем набивки в специальную форму. Высушенное глинистое сырье после дробления на дробилке ДГЩ-160x100 замачивалось до необходимой формовочной влажности (22,9-25,8%). После 1-суточной выдержки из глиномассы формовались образцы. Сушка образцов осуществлялась в помещении лаборатории на стеллажах, затем в сушильном шкафу при температуре 35-100°C. Режим обжига был аналогичен режиму обжига образцов полусухого прессования.

При этом физико-механические характеристики волластонитсодержащих керамических материалов несколько улучшаются. Заметно возрастает значение прочности при изгибе (с 2,0МПа до 5,7-10,4МПа), снижается воздушная (с 10,4% до 8,0-9,5%) и общая (с 11,7% до 8,9-10,5%) усадка. Водопоглощение незначительно увеличивается (с 9,5% до 11,3-14,9%), что является следствием повышенной пористости образцов.

Низкая прочность при изгибе образцов, отформованных из исходной глины Дарвагчайского месторождения, объясняется наличием в образцах обжиговых трещин. Одной из причин их образования может быть повышенное содержание в глине монтмориллонитового компонента.

Прочность образцов при сжатии при применении добавок уменьшается (с 42,2 до 22,5-35,9МПа). Следует отметить, что керамические образцы из исходной глины имеют высокое значение прочности при сжатии. При добавке 10-30% исследуемых пород в Дарвагчайскую глину значение прочности остается на достаточно высоком

уровне и из такой двухкомпонентной смеси можно прогнозировать получение стандартного кирпича марки 100 и выше.

Результаты исследования сырья проб №№ 2, 3 и 4 показали, что оно также может применяться в качестве технологической добавки при производстве керамического кирпича методом пластического формования. В таблицах 5–7 представлены свойства керамики, полученной из 2-компонентной сырьевой смеси (70-90% глинистого сырья Дарвагчайского месторождения и 10-30% цеолитсодержащих пород).

Глина Дарвагчайского месторождения относится к группе неспекающегося сырья. При температуре обжига 1150°C образцы вспучиваются и их средняя плотность снижается до значения 1,81 г/см³. Добавка в глину цеолитсодержащих пород позволяет устранить явление вспучивания, и двухкомпонентные смеси классифицируются как сильноспекающееся сырье (табл. 5). В зависимости от температуры спекания исследуемое сырье относится к группе сырья среднетемпературного спекания.

Керамические лабораторные образцы, полученные из двухкомпонентных сырьевых шихт, имеют удовлетворительный внешний вид, в то время как керамика из исходной глины имеет обжиговые трещины (табл. 6). Формование и обжиг изделий проводились по вышеописанной методике.

Физико-механические характеристики образцов приведены в таблице 7. Полученные данные свидетельствуют о положительном влиянии сырья проб №№ 2, 3 и 4, используемых в качестве технологических добавок, на свойства керамики.

Также значительно возрастает значение прочности при изгибе (с 2,0 МПа до 4,7-11,5 МПа), снижается воздушная (с 10,4% до 7,8-11,3%) и общая (с 11,7% до 8,7-12,3%) усадка. Водопоглощение незначительно увеличивается (с 9,5% до 10,75-15,44%).

Прочность образцов при сжатии при применении добавок уменьшается (с 42,2 до 19,6-37,3 МПа). Исключение составляет проба № 4. При ее 10% добавке прочность при сжатии незначительно возрастает (на 1,4 МПа).

Таблица 5 / Table 5.

Спекаемость глинистого сырья / Caking capacity of clay raw materials

№п/п / Item No.	Природа и содержание добавки / Nature and content of the additive	Наименование показате- лей / Name of indicators	Температура обжига, °C / Firing temperature, °C				Группа сырья в зависимо- сти от температуры и сте- пени спекания / Group of raw materials depending on the temperature and degree of sintering
			1050	1100	1125	1150	
1	-	Водопоглощение, % / Waterabsorption, %	8,25	7,07	6,40	1,15	Неспекающееся, средне- темпер. спекания / Non- caking, mediumtemp. sintering
		Средняя плотность, г/см ³ / Average density, g/cm ³	1,97	2,03	2,05	1,81	
2	10% про- бы 2/	Водопоглощение, % / Waterabsorption, %	10,26	10,08	8,90	1,34	Сильноспекающееся, среднетемпер. спекания / Highlycaking, mediumtemp. sintering
		Средняя плотность, г/см ³ / Average density, g/cm ³	1,91	1,92	1,94	2,14	
3	20% пробы 2 / samples 2	Водопоглощение, % / Waterabsorption, %	12,07	11,85	10,10	1,05	Сильноспекающееся, среднетемпер. спекания / Highlycaking, mediumtemp. sintering
		Средняя плотность, г/см ³ / Average density, g/cm ³	1,86	1,87	1,89	2,12	

4	30% пробы 2 / samples 2	Водопоглощение, % / Waterabsorption, %	13,73	13,30	13,08	0,77	Сильноспекающееся, среднетемп. спекания / Highlycaking, mediumtemp. sintering
		Средняя плотность, г/см ³ / Average density, g/cm ³	1,77	1,77	1,77	2,14	
5	10% пробы 3 / samples ³	Водопоглощение, % / Waterabsorption, %	10,70	10,14	7,89	1,29	Сильноспекающееся, среднетемп. спекания / Highlycaking, mediumtemp. sintering
		Средняя плотность, г/см ³ / Average density, g/cm ³	1,91	1,92	1,97	1,94	
6	20% пробы 3 / samples ³	Водопоглощение, % / Waterabsorption, %	12,52	12,14	11,98	0,95	Сильноспекающееся, среднетемп. спекания / Highlycaking, mediumtemp. sintering
		Средняя плотность, г/см ³ / Average density, g/cm ³	1,82	1,82	1,84	2,03	
7	30% пробы 3 / samples ³	Водопоглощение, % / Waterabsorption, %	13,98	13,54	13,46	0,54	Сильноспекающееся, среднетемп. спекания / Highlycaking, mediumtemp. sintering
		Средняя плотность, г/см ³ / Average density, g/cm ³	1,76	1,76	1,76	2,12	
8	10% пробы 4 / samples ⁴	Водопоглощение, % / Waterabsorption, %	9,96	9,29	8,35	1,45	Сильноспекающееся, среднетемп. спекания / Highlycaking, mediumtemp. sintering
		Средняя плотность, г/см ³ / Average density, g/cm ³	1,90	1,91	1,96	2,19	
9	20% пробы 4 / samples ⁴	Водопоглощение, % / Waterabsorption, %	11,62	11,05	10,47	1,68	Сильноспекающееся, среднетемп. спекания / Highlycaking, mediumtemp. sintering
		Средняя плотность, г/см ³ / Average density, g/cm ³	1,83	1,83	1,86	2,13	
10	30% пробы 4 / samples ²	Водопоглощение, % / Waterabsorption, %	13,17	12,88	12,32	1,80	Сильноспекающееся, среднетемп. спекания / Highlycaking, mediumtemp. sintering
		Средняя плотность, г/см ³ / Average density, g/cm ³	1,76	1,76	1,77	2,09	

Таблица 6. / Table 6.

Описание образцов после обжига / Description of samples after firing

№ п/п / Item No.	Природа и содержание добавки, % / Nature and content of the additive, %	Характеристика образцов / Characteristics of the samples			
		Цвет / Color	Звук / Sound	Наличие включений / Inclusions	Другие дефекты / Other defects
1	-	красно- рыжий / red-red	Глухой / Deaf	Редкие точечные включения белого цвета / Rare whitedot inclusions	Большое количество глубоких (сквозных) трещин / A large number of deep (through) cracks
2	10% пробы 2 / sample 2	Рыжий / Red	Звонкий / Voiced	Значительное количество точечных включений белого цвета / Significant amount of whitedots	Без дефектов / Nodefects
3	20% пробы 2 / sample 2	Рыжий / Red	Звонкий / Voiced	Большое количество точечных включений белого цвета / A large number of dotted inclusions of white color	Без дефектов / Nodefects
4	30% пробы 2 / sample 2	Рыжий / Red	Звонкий / Voiced	Большое количество точечных включений белого цвета / A large number of dotted inclusions of white color	Без дефектов / Nodefects
5	10% пробы 3 / sample 3	Рыжий / Red	Звонкий / Voiced	Значительное количество точечных включений белого цвета / A significant number of dotted inclusions of white color	Без дефектов / Nodefects

6	20% пробы 3 / sample 3	Рыжий / Red	Звонкий / Voiced	Большое количество точечных включений белого цвета / A large number of dotted inclusions of white color	Без дефектов / Nodefects
7	30% пробы 3 / sample 3	Рыжий / Red	Звонкий / Voiced	Большое количество точечных включений белого цвета / A large number of dotted inclusions of white color	Без дефектов / Nodefects
8	10% пробы 4 / sample 4	Рыжий / Red	Звонкий / Voiced	Значительное количество точечных включений белого цвета / A significant number of dotted inclusions of white color	Небольшое кол-во нитевидных трещин (2-3 на образце) / Small number of filiform cracks (2-3 persample)
9	20% пробы 4 / sample 4	Рыжий / Red	Звонкий / Voiced	Большое количество точечных включений белого цвета / A large number of dotted inclusions of white color	Без дефектов / Nodefects
10	30% пробы 4 / sample 4	Рыжий / Red	Звонкий / Voiced	Большое количество точечных включений белого цвета / A large number of dotted inclusions of white color	Без дефектов / Nodefects

Таблица 7 / Table 7.

**Физико-механические свойства обожженных образцов /
Physical and mechanical properties of fired samples**

№ п/п / Item No.	Природа и содержание добавки / Nature and content of the additive	Линейная усадка, % / Linears hrinkage, %		Водопоглощение, % / Waterabsorption, %	Прочность, МПа / Strength, MPa	
		Воздушная / Air	Об- щая / General		При сжа- тии / In compression	При изгибе / In bending
1	-	10,4	11,7	9,57	42,2	2,0
2	10% 2	9,3	10,2	11,56	36,8	6,8
3	20% 2	8,7	9,5	13,10	29,4	7,9
3	30% 2	8,2	9,0	15,44	19,6	9,3
4	10% 3	9,9	10,8	11,27	37,5	6,4
5	20% 3	8,1	9,6	12,95	30,1	8,0
5	30% 3	7,8	8,7	15,10	26,4	11,9
6	10% 4	11,3	12,3	10,75	43,6	4,7
7	20% 4	9,9	11,0	12,51	37,3	7,2
7	30% 4	8,7	9,4	14,07	26,2	11,5

Выводы

С увеличением содержания (с 10 до 30%) исследуемых технологических добавок прочность образцов при изгибе возрастает, прочность при сжатии снижается, воздушная и общая усадка уменьшаются, водопоглощение увеличивается. Такое влияние исследованных пород на свойства керамики объясняется наличием в их составе различных минералов: монтмориллонита, опал-кристобалита, кальцита и цеолита. Комплекс данных минералов способствует интенсификации спекания и образованию более пористой структуры керамического черепка.

Прогнозная марка керамического кирпича из 2-компонентных сырьевых смесей, содержащих в качестве технологической добавки сырье проб №№ 2; 3 и 4, «100» и выше.

Также эффективным может быть использование данных пород в смеси с плохо спекающимися полиминеральными глинами (керамические образцы из исходного сырья имеют низкие значения прочностных характеристик). В этом случае прочность при сжатии увеличится и марка готовой продукции (керамических стеновых материалов) повысится.

Литература

1. Гусейханов С. М., Юсупов А. Р., Абдуллаев М. Ш., Черкашин В. И. Геологическое строение юго-восточной части Горного Дагестана. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2016. – № 66. – С. 34-40.
2. Зальманг Г. Физико-химические основы керамики. – М.: Госстройиздат, 1959. – С. 108.
3. Конюхова Т. П., Дистанов У. Г. Технологическая классификация смешанных кремнистых цеолитсодержащих пород. // Разведка и охрана недр. – 2000. – № 9. – С. 45-46.
4. Куковский Е. Г. Особенности строения и физико-химические свойства глинистых минералов. – Киев: Наукова Думка, 1966. – 132 с.
5. Мороз И. Н. Технология строительной керамики. – Киев: Виша школа, 1972. – 416 с.
6. Наумов М. М., Кашкаев И. С., Буз М. А., Шейнман Е. Ш. Технология глиняного кирпича. – М.: Стройиздат, 1959. – С. 16.
7. Павлов В. Ф. Физико-химические основы обжига изделий строительной керамики. – М.: Стройиздат, 1977. – С. 19, 58.
8. Роговой М. И. Технология искусственных пористых заполнителей и керамики. – М.: Стройиздат, 1974. – С. 41, 228.
9. Талпа Б. В., Агарков Ю. В., Бардин Ю. Ю. Кремнистые породы – новая сырьевая база стройиндустрии Северного Кавказа. // Разведка и охрана недр. – 1992. – № 11. – С. 12-14.
10. Тотурбиев Б. Д., Мамаев С. А., Тотурбиева У. Д. Инновационные технологии производства экологически чистых строительных материалов нового поколения. // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – № 4. – С. 149-155. DOI:10.23671/VNC.2018.4.20155
11. Тотурбиев Б. Д., Мамаев С. А., Тотурбиев А. Б. Низкообжиговая, энергосберегающая, экологически безопасная технология производства керамических материалов на основе глинистых сланцев. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12 (1). – С. 148-161. DOI: 10.46698/VNC.2022.45.82.011.
12. Хардигов А. Э. Цеолиты Северного Кавказа. – Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 2005. – 224 с.
13. Хардигов А. Э., Бойко Н. И., Агарков Ю. В. Цеолиты Восточного Предкавказья и перспективы их практического использования. // Изв. высш. учебн. завед. Геология и разведка. – 1992. – № 6. – С. 86-91.
14. Черняк Л. П., Мороз Б. И. Технология, структурообразование и свойства строительной керамики. – Киев: Знание, 1979. – С. 23.
15. Юсупов А. Р., Черкашин В. И., Алхулаев К. Г. Геолого-генетическая и прогнозно-поисковая модель месторождения цеолитов и цеолитсодержащих пород Нагорного Дагестана. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2015. – Вып. 64. – С. 132-137.
16. Sandberg J. The effect of 4 alkanolamines on pore water composition and strength development of mortar. // Proc. of the 12th Intern. Congress on the Chemistry of Cement. – 2007. – pp. 486-496.
17. Perez J., Nonat A., Garaffault-Gauffinet S., et al. Influence of triisopropanolamine on the physico-chemical and mechanical properties of pure cement pastes and mortars. // Proc. of the 12th Intern. Congress on the Chemistry of Cement. – 2007. – pp. 454-464.
18. Unland G., Meltke K., Popov O., et al. Assessment of the grindability of cement clinker. Part 2. // Cement International. – 2003. – No. 2. – pp. 55-63.
19. Udin H., Shaler A. J., Wuef J. The Surface Fension of Solid Copper, Frans. // AIME. – 1949. – pp. 186-190.

20. Grecnouq L.A. P. Fech Note Met. 151, Royol Aircraft Establishment. // Prescribed in G.A. Geach, «The Fheory of Sinterinq», Proqr. Metal. Phys. – 1953. – No. 4. – p. 174.

References

1. Guseykhonov S. M., Yusupov A. R., Abdullaev M. Sh., Cherkashin V. I. Geological structure of the southeastern part of the Mountainous Dagestan. Proceedings of the Institute of Geology of the DSC RAS. 2016. No. 66. pp. 34-40. (in Russ.)
2. Zalmang G. Physical and chemical foundations of ceramics. Moscow. Gosstroyizdat, 1959. P. 108. (in Russ.)
3. Konyukhova T. P., Distanov U. G. Technological classification of mixed siliceous zeolite-containing rocks. Exploration and protection of mineral resources. 2000. No. 9. pp. 45-46. (in Russ.)
4. Kukovsky E. G. Features of the structure and physico-chemical properties of clay minerals. Kyiv, Naukova Dumka. 1966. 132 p. (in Russ.)
5. Moroz I. N. Technology of building ceramics. Kyiv, Visha Shkola. 1972. 416 p. (in Russ.)
6. Naumov M. M., Kashkaev I. S., Buz M. A., Sheinman E. Sh. Clay brick technology. Moscow. Stroyizdat, 1959. P. 16. (in Russ.)
7. Pavlov V. F. Physical and chemical bases of roasting building ceramics. Moscow. Stroyizdat. 1977. P. 19, 58. (in Russ.)
8. Rogovoi M. I. Technology of artificial porous aggregates and ceramics. Moscow. Stroyizdat. 1974. P. 41, 228. (in Russ.)
9. Talpa B. V., Agarkov Yu. V., Bardin Yu. Yu. Siliceous rocks are a new raw material base for the construction industry in the North Caucasus. Exploration and protection of mineral resources. 1992. No. 11. pp. 12-14. (in Russ.)
10. Toturbiev B. D., Mamaev S. A., Toturbieva U. D. Innovative production technology of new generation building materials. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2018. No. 4. pp. 149-155. (in Russ.) DOI:10.23671/VNC.2018.4.20155.
11. Toturbiev B. D., Mamaev S. A., Toturbiev A. B. Low-burning, energy-saving, environmentally safe technology for producing ceramic materials based on clay shales. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12 (1). pp. 148-161. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.45.82.011.
13. Khardikov A. E., Boyko N. I., Agarkov Yu. V. Zeolites of the Eastern Ciscaucasia and prospects for their practical use. *Izv. vyssh. uchebn. zaved. Geology and exploration*. 1992. No. 6. pp. 86-91. (in Russ.)
14. Chernyak L. P., Moroz B. I. Technology, structure formation and properties of building ceramics. Kyiv, Znanie. 1979. P. 23. (in Russ.)
15. Yusupov A. R., Cherkashin V. I., Alkhulaev K. G. Geological-genetic and predictive-search model of the deposit of zeolites and zeolite-containing rocks of Nagorny Dagestan. Proceedings of the Institute of Geology of the DSC RAS. 2015. Issue. 64. pp. 132-137. (in Russ.)
16. Sandberg J. The effect of 4 alkanolamines on pore water composition and strength development of mortar. In: Proc. of the 12 th Intern. Congress on the Chemistry of Cement. 2007. pp. 486-496.
17. Perez J., Nonat A., Garaffault-Gauffinet S., et al. Influence of triisopropanolamine on the physico-chemical and mechanical properties of pure cement pastes and mortars. In: Proc. of the 12th Intern. Congress on the Chemistry of Cement. 2007. pp. 454-464.
18. Unland G., Meltke K., Popov O., et al. Assesment of the grindability of cement clinker. Part 2. *Cement International*. 2003. No. 2. pp. 55-63.
19. Udin H., Shaler A. J., Wuef J. The Surface Fension of Solid Copper, *Frans. AIME*. 1949. pp. 186-190.
20. Grecnouq L. A. P. Fech Note Met. 151, Royol Aircraft Establishment. Prescribed in G.A. Geach, *The Fheory of Sinterinq*, Proqr. Metal. Phys. 1953. No. 4. p. 174.

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 551.588.2 (3) (7); 57.045

DOI: [10.46698/VNC.2022.19.77.012](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.19.77.012)

Оригинальная статья

Анализ парниковых газов на нефтезагрязненных территориях и разработка методов их биорекультивации (на примере г. Грозный)

М. Ю. Маркарова^{1, 2}, Л. Ш. Махмудова¹, И. А. Керимов^{1, 3},
А. С. Эльжаев¹, Н. А. Мамадиев¹

¹Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад.
М. Д. Миллионщикова, Россия, 364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им.
Х. А. Исаева, д. 100, e-mail: kerimov@ifz.ru;

²Федеральный научный центр овощеводства, Россия, 143080, Московская обл., поселок
ВНИИССОК, ул. Селекционная, д. 14;

³Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Россия, 123242, г. Москва, ул.
Б. Грузинская, д. 10, стр. 1

Статья поступила: 31.10.2022, доработана: 24.11.2022, одобрена в печать: 30.11.2022

Резюме: Актуальность работы. Нефтезагрязненные территории являются источниками повышенной эмиссии парниковых газов, что связано с постоянными процессами трансформации углеводородов под действием физических, физико-химических и биологических факторов. Исследована интенсивность эмиссии метана и углекислого газа на участке хранения нефтеотходов. Участок относится к объектам накопленного экологического ущерба прошлых лет, расположен в Заводском районе г. Грозный на территории бывшего Новогрозненского НПЗ им. Н. Анисимова. Показано, что после выжигания нефтешлама и образования плотной грунтовой корки, наибольший вклад в эмиссию вносит фактор увлажненности грунта, усиливающий пористость поверхности и выделение парниковых газов. Увеличение температуры окружающей среды приводит к пропорциональному усилению эмиссии парниковых газов в случае нарушения целостности корки из сгоревших нефтепродуктов и грунта. С учетом состава нефтеотходов экспериментального участка разработан биоконсорциум для активизации биологической деструкции углеводородов и заложен полевой опыт. **Целью работы** является изучение эффективности методов биопереработки нефтеотходов с позиции процессов декарбонизации и эмиссии парниковых газов. Одной из задач опыта является разработка приемов трансформации углеводородов в почвенное органическое вещество для максимального сохранения углерода нефти в почве и улучшения показателей ее биопродуктивности. **Методы работы.** Лабораторные исследования показали, что обработка почвы экспериментальным биоконсорциумом МБК-А усиливает интенсивность почвенного дыхания, ускоряет очищение грунта от углеводородов на 55-58% за 2 месяца, использование соломы в качестве структуратора наряду с МБК-А стимулирует очищение с еще большей скоростью – до 67% за 2 месяца. Использование укрывного материала замедляет почвенное дыхание и снижает скорость трансформации углеводородов с использованием МБК-А с соломой и без нее. Однако, именно данный прием (применение укрывного материала) может стать наиболее перспективным для улучшения и восстановления почвенного плодородия впоследствии за счет процессов трансформации углеводородов в почвенную органику. **Результаты работы.** Полученные данные этого и последующих лет наблюдений позволят обосновать наиболее эффективные методы декарбонизации при переработке нефтесодержащих отходов для ликвидации участков накопленного экологического ущерба прошлых лет в Чеченской Республике.

Ключевые слова: нефтеотходы, парниковые газы, почвенное дыхание, биодеструкция, трансформация.

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзаданий № FZNU-2021-0011 «Изучение секвестрационного и эмиссионного потенциала карбонового полигона «ЭкоГрозный» и разработка научно-обоснованных технологий декарбонизации (на примере Чеченской Республики)» №FZNU-2021-0002 «Оценка изменчивости агроклиматических условий Северного Кавказа в связи с глобальными изменениями климата» и №FZNU-2021-0012 «Комплексная интерпретация геофизических и геоэкологических данных для изучения баланса парниковых газов».

Для цитирования: Маркарова М.Ю., Махмудова Л.Ш., Керимов И.А., Эльжаев А.С., Мамадиев Н.А. Анализ парниковых газов на нефтезагрязненных территориях и разработка методов их биорекультивации (на примере г. Грозный). *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (4): 153-168. DOI: 10.46698/VNC.2022.19.77.012.

GEOECOLOGY

DOI: [10.46698/VNC.2022.19.77.012](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.19.77.012)

Original paper

Analysis of greenhouse gases in oil-controlled areas and development of methods for their biorecultivation (for example of Grozny)

M. Yu. Markarova^{1, 2}, L. Sh. Makhmudova¹, I. A. Kerimov^{1, 3},
A. S. Elgaev¹, N. A. Mamadiev¹

¹Grozny State Oil Technical University named after Academician M. D. Millionshchikov, 100Kh. A. Isaeva, Grozny 364051, Russian Federation, e-mail: kerimov@ifz.ru;

²Federal Scientific Center for Vegetable Growing, 14 st. Selektionnaya, Moscow region, VNISSOK settlement 143080, Russian Federation;

³Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10/1 B. Gruzinskaya Str., Moscow 123995, Russian Federation

Received: 31.10.2022, revised: 24.11.2022, accepted: 30.11.2022

Abstract: Relevance. Oil-contaminated territories are sources of increased greenhouse gas emissions, which is associated with the constant processes of transformation of petroleum hydrocarbons under the influence of various factors. The intensity of methane and carbon dioxide emission in the area of oil waste storage has been studied. The site refers to the objects of accumulated environmental damage of past years, located in the Zavodskoy district of Grozny on the territory of the former Novogrozny Oil Refinery named after. N. Anisimova. An increase in ambient temperature leads to an increase in greenhouse gas emissions in the event of a violation of the integrity of the crust from burnt oil products and soil. Taking into account the composition of oil waste from the experimental site, a bioconsortium was developed to activate the biological destruction of hydrocarbons and a field experiment was laid. **The aim of the experiment** is to study the effectiveness of oil waste biorefining methods from the standpoint of decarbonization processes and greenhouse gas emissions. One of the objectives of the experiment is to develop methods for the transformation of petroleum hydrocarbons into soil organic matter to maximize the conservation of oil carbon in the soil and improve its bioproductivity. **Methods.** Laboratory studies have shown that tillage with the experimental bioconsortium MBK-A enhances the intensity of soil respiration, accelerates the purification of soil from hydrocarbons by 55-58% in 2 months, the use of straw as a structurant

along with MBK-A stimulates purification at an even faster rate – up to 67% for 2 months. The use of covering material slows down soil respiration and reduces the rate of hydrocarbon transformation using MBK-A with and without straw. **Results.** The obtained data of this and subsequent years of observations will allow to substantiate the most effective methods of decarbonization in the processing of oily waste.

Keywords: oil waste, greenhouse gases, soil respiration, biodegradation, transformation.

Acknowledgment: *The work was carried out within the framework of the state task of Academician M.D. Millionshchikov GSOTU: No. FZNU-2021-0011 “Study of sequestration and emission potential of the carbon landfill “EcoGrozny” and development of scientifically based decarbonization technologies (on the example of the Chechen Republic)” and No. FZNU-2021-0012 «Complex interpretation of geophysical and geoeological data for studying the balance of greenhouse gases».*

For citation: Markarova M. Yu., Makhmudova L. Sh., Kerimov I. A., Elgaev A. S., Mamadiev N. A. Analysis of greenhouse gases in oil-controlled areas and development of methods for their biorecultivation (for example of Grozny). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (4): 153-168. DOI: 10.46698/VNC.2022.19.77.012.

Введение

В мае 2022 года в Чеченской Республике был открыт первый Карбоновый полигон на Северном Кавказе. Одним из направлений работы полигона является изучение эмиссии парниковых газов и процессов декарбонизации, исследование загрязненных углеводородами участков и разработка методов снижения их негативного действия на компоненты природной среды: почву, водоемы, воздух.

На территории Чеченской Республики история разведки и добычи нефти насчитывает около 130 лет. Наибольшими темпами развития нефтегазовая отрасль республики характеризовалась в советские времена, затем объемы добычи значительно упали. Вместе с тем, в силу исторических причин, в первую очередь из-за военных событий 1994-2000 гг., когда была уничтожена значительная часть инфраструктуры, в том числе и грозненские нефтеперерабатывающие заводы, остались объекты накопленного экологического ущерба: заброшенные скважины, амбары, полигоны хранения нефтеотходов, нефтехранилища, загрязненные нефтепродуктами участки.

К нефтесодержащим относятся отходы, образующиеся при хранении, перевозке, использовании нефти и нефтепродуктов, при зачистке оборудования для хранения нефти, при очистке нефтесодержащих сточных вод. Эффективные методы переработки нефтешламов, которые законсервированы в резервуарах, амбарах, нефтешламонакопителях, для условий Северного Кавказа практически не разрабатывались. При длительном хранении нефтешлам претерпевает ряд изменений, расслаивается на фазы, условно это нефтепродукты, вода и грунт [Маркарова и др., 2016]. Хранение нефтешлама имеет свои негативные экологические стороны. Например, грунтовые обваловки шламонакопителей могут разрушиться, тогда подвижная фаза (нефтепродукты и вода с растворенными в ней углеводородами) попадают в сопредельные среды (в почву, водотоки, грунтовые воды). Объекты хранения нефтеотходов являются источниками постоянного притока парниковых газов в атмосферу. Вопрос ликвидации амбаров временного хранения и шламонакопителей в настоящее время решается рядом методов. Утилизация нефтешлама ведется по разным направлениям [Литвинова, 2016; Соколов, 2017; Хуснутдинов и др., 2015; Черных, Садчиков, 2016]:

- При сжигании и инсenerации получают инертный твердый осадок, который в основном захороняют на полигонах ТБО.

- При физическом и физико-химическом разделении фаз нефтесодержащий компонент возвращают в промышленный цикл переработки нефти, грунты обезвреживают, обогащают и возвращают в очищенном виде в природную среду, водную фазу после многократной очистки используют в производственном цикле переработки нефтешлама.

- При биологических подходах применяют специально подобранные комплексы микроорганизмов – деструкторов, которые способны за относительно короткий период времени разрушить нефтепродукты в почвенной и водной фазах нефтешлама, удобрения и биосурфактанты для активизации биологических процессов [Коршунова и др., 2014; Маркарова и др., 2016; Мильман, Гильванова, 2014; Соловьянов, 2012; Bezza et al., 2015; Bhattacharya et al., 2015; Nasreen et al., 2018].

Вопрос выбора технологий зависит от состава нефтеотходов, концентрации в нем нефтепродуктов и стоимости реализации их для конкретных условий.

В рамках работы по Карбоновому полигону обследован ряд нефтезагрязненных участков, в том числе полигоны хранения нефтеотходов [Керимов и др., 2021; Керимов, Эзирбаев, 2022]. Подобраны технологические решения по утилизации нефтешлама, размещенного на экспериментальных участках. В настоящей работе приведены данные по участку, который находится в пределах Заводского района г. Грозный на территории бывшего Новогрозненского НПЗ им. Н. Анисимова.

Методы исследования

В конце августа 2022 года был заложен стационарный опыт на исследуемом экспериментальном участке, загрязненном нефтеуглеводородами. Нефтеотходы представляли собой смесь тяжелых парафинов и масел, отходы Новогрозненского НПЗ имени Н. Анисимова и НПЗ имени А. Шерипова. Участок относится к объектам накопленного экологического ущерба прошлых лет. Вид участка с БПЛА представлен на рисунке 1. Натурное обследование территории шламонакопителей осенью 2022 г. показало следующее. Экспериментальный участок включает четыре площадки – нефтезагрязненные зоны, каждая площадью около 900 м². К настоящему времени произошло зарастание обваловок и сопредельной территории злаково-разнотравной и кустарниковой растительностью. Растения в хорошем состоянии, проективное покрытие до 100%. На исследуемых территориях с краев к центру с разной степенью интенсивности также происходит зарастание участков злаками, площадь проективного покрытия от 5 до 80%. Нефтеотходы внутри площадок ранее подвергались отжигу, о чем свидетельствует тот факт, что на поверхности каждой зоны сформировалась плотная корка, представленная продуктами горения нефтеотходов и минерального грунта, черного и коричневого цвета с характерным запахом гари. Толщина корки до 5-7 см, под ней обнаруживаются слои до 25-50 см серого цвета нефтеотходов, маслянистой консистенции, смешанных с грунтом, ниже находится вода. Поверхность шламонакопителей неустойчива, при движении по поверхности происходит колебание грунта.

Из проб нефтешлама в 2022 г. был выделен экспериментальный консорциум бактерий углеводородокисляющего действия, относящихся к родам *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhodococcus*. Выделенные из нефтешлама бактерии не являются патогенными для растений и теплокровных животных. Рабочее название МБК-А. Для полевого опыта бактерии выращивали на жидких полусинтетических средах, содержащих нефтешлам с экспериментального участка, в условиях интенсивной аз-



Рис. 1. Схема расположения нефтезагрязненных площадок на экспериментальном участке (Заводской район г. Грозный). Условные обозначения: 1 – точки наблюдений; 2 – контуры нефтезагрязненных площадок /

Fig. 1. Layout of oil-contaminated sites at the experimental site (Zavodskoy district of Grozny). Legend: 1 – observation points; 2 – contours of oil-contaminated sites

рации. Титр живых клеток в рабочем растворе составлял не менее $2-4 \times 10^9/1$ мл. Расход 1 литр на 4 м^2 .

Гумат в виде 0,01% раствора лигногумата, как и минеральное удобрение азофоска, внесены в соответствующие варианты опыта, как стимуляторы микробиоты.

Опираясь на предшествующие результаты научно-технических работ в Республике Коми [Маркарова и др, 2016], помимо метода обезвреживания нефтеотходов биодеструкцией с использованием нефтеокисляющих бактерий, применили еще два биотехнологических приема:

- использовали солому для улучшения аэрофильности нефтезагрязненного субстрата. Для активизации разрушения целлюлозы в составе соломы ее обрабатывали природным штаммом *Trichoderma lignorum*, выделенным из почвы, прилегающей

щей к полигону территории. Титр спор в рабочем растворе при обработке соломы $10^5/1$ мл. Расход 1 литр на 4 м^2 . Рабочее название БП-Т;

– применили прием активизации процессов нефтеокисления в частично-аэробных условиях для изучения динамики парниковых газов при трансформации смолисто-масляных и гетероциклических компонентов нефтешлама в прогуминовые вещества почвы. Это важно с позиций декарбонизации за счет преобразования углерода нефти в почвенное органическое вещество, а также снижения выбросов парниковых газов в атмосферу в процессе обезвреживания нефтешлама и последующей рекультивации грунтов и почв на территории полигона.

В опыте задействованы две площадки, обозначенные на рисунке 1 под №№ 2 и 3. На каждой из них разбито 25 делянок, площадью $2 \times 2\text{ м}$ (полосы по пять делянок в каждой) (рис. 2, 3). Перед внесением стимуляторов биоразрушения нефтеуглеводородов на опытных делянках сформировали борозды глубиной до 10 см (рис. 2).

Схема опыта следующая:

1-я полоса – контроль;

2-я полоса – обработка экспериментальным биоконсорциумом нефтеокисляющего действия (МБК-А) и гуматом;

3-я полоса – обработка МБК-А, гуматом, внесение соломы и биоконсорциума на основе микровицетов *Trichoderma lignorum* в споровой форме (БП-Т) для ускорения разрушения целлюлозы;

4-я полоса – обработка МБК-А, гуматом, укрывание пленкой;

5-я полоса – обработка МБК-А, гуматом, внесение соломы, БП-Т, укрывание пленкой.

Повторность опыта 5-тикратная. В грунт всех вариантов при закладке опыта внесено минеральное удобрение азофоска $\text{N}_{10}\text{P}_{16}\text{K}_{16}$ из расчета 60 кг действующего вещества на 1 га по каждому из элементов питания. Внесение азофоски предусмотрено двукратное, в момент закладки опыта и через неделю после выпадения



Рис. 2. Формирование борозд на опытном участке /
Fig. 2. Formation of furrows in the experimental area



Рис. 3. Вид опытных деленок 2-й площадки после обработки грунта рекультивантами /
Fig. 3. View of experimental plots of the 2nd site after soil treatment with recultivants

осадков. Это связано с тем, что летний сезон 2022 года в Чеченской Республике был жарким и сухим, в период с июля по сентябрь включительно осадки почти не выпадали. Среднесуточная температура воздуха составляла от $+25^{\circ}\text{C}$ до $+28^{\circ}\text{C}$. Температура поверхности грунта в летние дневные часы на опытном участке достигала $+55 - +60^{\circ}\text{C}$. Ожидать интенсификации биотрансформации углеводов в таких условиях не приходилось. После выпадения осадков в октябре 2022 года и снижения среднесуточной температуры до $+12 - +18^{\circ}\text{C}$ было проведено повторное внесение минерального удобрения и укрывание полос №№ 4 и 5 пленкой.

Параллельно опыт был заложен в лабораторных условиях в вегетационных сосудах, объем пробы для опыта 1,0 л; вес 1320 г, при нормальных влажности и температуре (55-60% и $+25^{\circ}\text{C}$ соответственно). Исходная концентрация нефтеуглеводородов в опытном субстрате составила 365-390 мг/кг. В опыте отслеживали интенсивность почвенного дыхания по динамике выделения CO_2 и оценивали концентрацию нефти в опытном субстрате в начале опыта и через 2 месяца.

В полевых условиях 2022 года были проведены замеры эмиссии парниковых газов (CO_2 и CH_4) в течение недели после закладки опыта, в лабораторном опыте прослежена динамика интенсивности почвенного дыхания в соответствии с методиками, изложенными в [Паников, 1988; Методы, 1977], по скорости выделения CO_2 и интенсивности трансформации нефтеуглеводородов за 2 месяца опыта.

После закладки опыта в светлое время суток в течение 3-х дней проводили измерения интенсивности эмиссии парниковых газов. Измерения температуры и влажности поверхностного слоя исследуемого участка, интенсивности эмиссии CO_2 и CH_4 проводили при помощи мобильной почвенной камеры для измерения потоков парниковых газов (CO_2 , CH_4), с поверхности почвы на основе анализатора закрытого типа G4301 (Mobile Gas Concentration Analyzer) (Picarro – США).

В лабораторном опыте определяли скорость преобразования нефтеуглеводородов до газообразного состояния по дыхательной активности почвы (по скорости выделения CO_2) [Микроорганизмы, 1989]. Для этого навеску почвы (1 г) с есте-

ственной (опытной) влажностью помещали в пенициллиновые флаконы. Флаконы закрывали герметичными крышками и проводили отбор пробы воздуха из флакона. Объем анализируемой пробы – 1 мл. Пробу закалывали в хроматографическую колонку газового хроматографа (Chrom-5). Закрытую во флаконе пробу инкубировали при 25°C в течение 1 часа, после чего отбирали воздушную пробу и вновь анализировали ее на хроматографе. Расчет интенсивности дыхания почвы проводили по следующей формуле:

$$V = [(C_2 * V_1 / V_1 - V_2) - C_1] V_1 / m * t,$$

где V – интенсивность дыхания почвы, мкг С-СО₂/час, 1 г почвы; C_1 и C_2 – концентрация углекислого газа во флаконе после и до инкубации, ppm; V_1 – объем воздушной фазы флакона, см³; V_2 – объем почвенной пробы, см³; m – масса почвенной навески, г; t – время инкубации флакона в термостате, с.

Определение содержания нефтеуглеводородов в почве осуществляли гравиметрическим методом в соответствии с РД 52.18.647-2003.

Обзор геофизических методов при исследовании характеристики структуры почвы приведен в работе [Romero-Ruizand et al., 2018]. Авторы рассмотрели возможности использования геофизических методов при изучении характеристик структуры почвы напрямую (через влияние пор почвы, переноса и механических свойств на геофизические сигналы) или косвенно путем измерения суррогатных переменных (влажность, скорость дренажа). В данной работе изучены основные аспекты структуры почвы и проблемы характеристики в пространственном и временном масштабах, а также то, как геофизические методы могут быть использованы для решения этой задачи [Romero-Ruizand et al., 2018].

На нефтезагрязненном участке были выполнены геофизические исследования. Особенность геофизических наблюдений в том, что они, не изменяя геологическую среду, могут многократно повторяться [Огильви, 1990]. Целью исследований ставилось изучение слоя техногенного грунта (нефтеотходов). Для этого на площадке №2 была собрана электроразведочная мини-установка, состоящая из двух питающих и двух измерительных электродов. Зарегистрированные значения удельных электрических сопротивлений при предварительной обработке полевых данных позволили выявить аномалии, характеризующиеся низкоомными значениями, что указывает, вероятнее всего, на наличие жидкой фазы в слое нефтеотходов. В дальнейшем планируется с помощью электротомографии оценить мощность шламового слоя и фильтрационные свойства бортов шламохранилищ на предмет наличия утечек в окружающую среду. Кроме того, задачи, связанные с оценкой во времени состояния геологической среды на ограниченных территориях с целью уточнения степени их экологической опасности, могут решаться с помощью сейсмического мониторинга [Попов, Попова, 2021].

Результаты работы и их обсуждение

Объекты накопления нефтеотходов, как и нефтезагрязненные земли, являются источником повышенной эмиссии парниковых газов, что связано и с испарениями самих углеводородов, поскольку в почве постоянно идут процессы химического, фотохимического превращения углеводородов [Нефтезагрязненные биогеоценозы, 2008], и с почвенным дыханием, обусловленным микробными и растительными взаимодействиями в нарушенной экосистеме в процессе ее самовосстановления и биодеструкции нефтяных соединений [Koshlaf et al., 2017]. Интенсивность всех

этих процессов зависит от ряда факторов. Среди них наиболее значимые – состав и возраст нефтяного загрязнения, активность почвенной микробиоты, температура окружающей среды и влажность, характер и скорость трансформации нефти при использовании разных методов рекультивации земель и переработки нефтеотходов [Маркарова и др., 2016; Sarkar et al., 2005]. Сырая нефть является источником выделения легких углеводородов, в том числе метана, что связано с содержанием в ее составе летучих фракций. На участках возрастных нефтезагрязнений происходит выделение продуктов промежуточного разрушения более сложных углеводородов как результат активизации физико-химических и биологических процессов трансформации нефти и активизации почвенной микробиоты [Оборин и др., 2008; Khan et al., 2004]. На этой стадии очищения почв наблюдается интенсификация выделения углекислого газа, наряду с высокой интенсивностью выделения метана, этана, пропана. На еще более поздних стадиях самовосстановления загрязненных территорий активность микробиоты возрастает и, соответственно, возрастает и интенсивность выделения CO_2 .

Оценка выделения парниковых газов на опытном участке проведена в начале опыта. Площадки №№ 2 и 3 – после разбивания корки на поверхности, площадки №№ 1 и 4 – контрольные. Как видно из рисунка 4, интенсивность почвенного дыхания в целом на площадках низкая. Это связано и с высокой температурой окружающей среды, и с плотностью корки, как итог – с низкой скоростью биологических процессов в таких условиях. Можно заметить, что со снижением суточной температуры воздуха и уменьшением влажности почвы снижается и эмиссия углекислого газа с ее поверхности.

Эмиссия метана, после разрушения поверхностной корки, усилилась на опытных площадках №№ 2 и 4 (рис. 5). Это свидетельствовало о том, что слой горелого грунта и нефтепродуктов на поверхности площадок хранения нефтеотходов тормозил все процессы деструкции нефтепродуктов, в том числе и физические, связанные с испарением легких фракций нефти. После разрушения корки газообразные углеводороды начали высвобождаться из нефтешлама. Наряду с этим усилились и биопроцессы, напрямую связанные с условиями увлажнения. Именно на площадках 2 и 4 увеличение уровня суточного увлажнения коррелировало с величиной выделения метана из почвы.

Оценка полевого опыта по ряду целевых показателей (эмиссия парниковых газов, интенсивность очищения субстрата от углеводородов, биологическая активность почвы) будет выполнена в будущем году. В текущем сезоне была возможность оценить эффективность предлагаемых методов биологической очистки нефтешлама с исследуемого участка только в лабораторном опыте. Представлены данные за 2 месяца наблюдений.

В начале опыта, через месяц и через 2 месяца в почве определили концентрацию нефтеуглеводородов (рис. 6). Их деструкция прошла в зависимости от вида обработки и условий опыта по-разному. Наиболее высокой скоростью очистки характеризовался грунт, обработанный МБК-А и гуматом с добавлением соломы и БП-Т (полоса 3). Здесь за 2 месяца концентрация загрязнения снизилась в 3 раза с 365 до 120 мг/кг (67%). Тот же вариант, но с укрытием поверхности пленкой показал меньшую скорость очищения субстрата – загрязнение снизилось за 2 месяца на 47%. Без соломы интенсивность очищения почвы без укрывного материала составила 58%, под пленкой – 41%. Снижение уровня загрязнения почвы в контрольном варианте составило 12% за 2 месяца наблюдений.

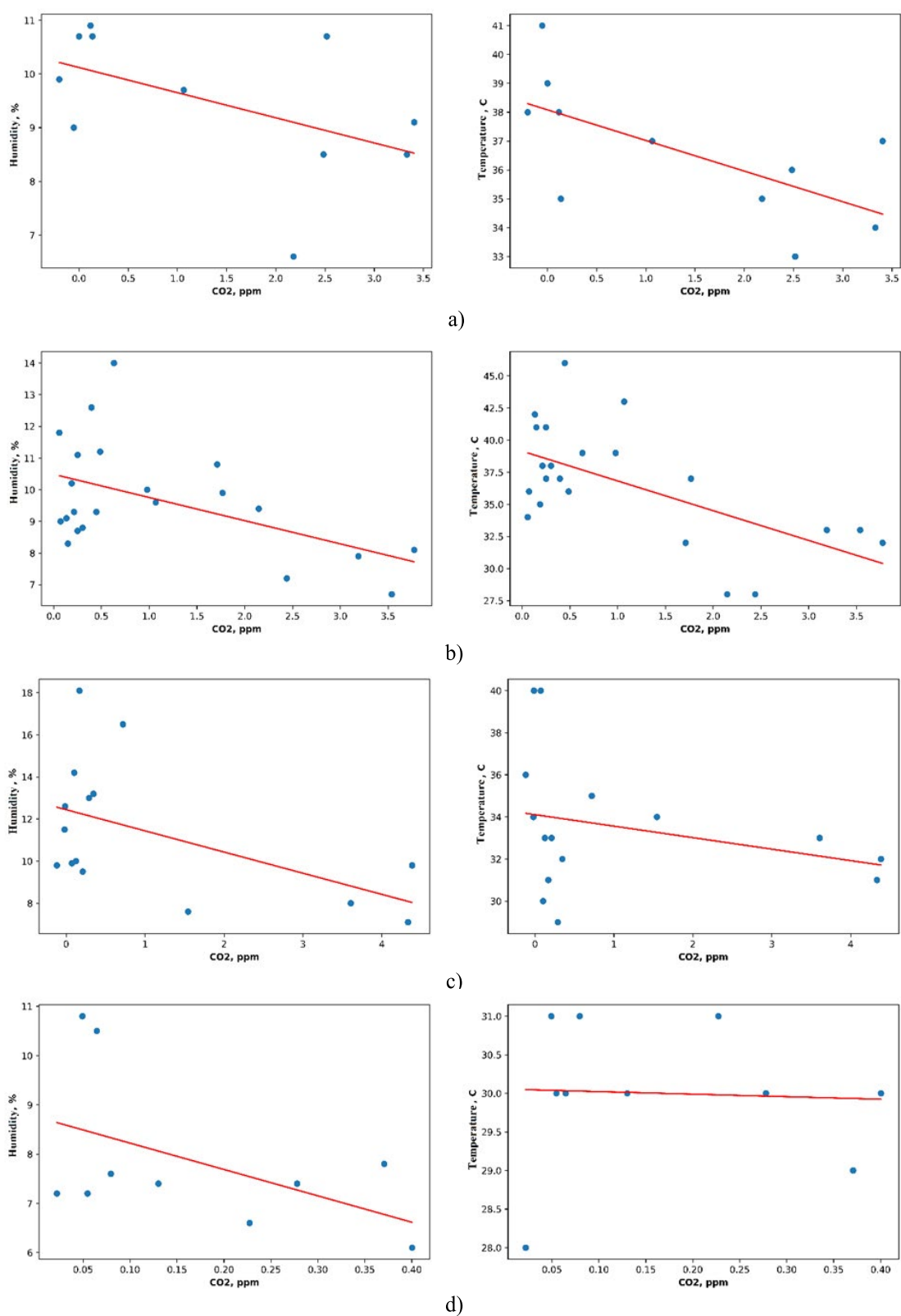


Рис. 4. Зависимость потоков CO_2 от температуры и влажности подстилающей поверхности на участке хранения нефтеотходов: а) площадка № 1; б) площадка № 2; в) площадка № 3; д) площадка № 4 /

Fig. 4. Dependence of CO_2 fluxes on the temperature and humidity of the underlying surface at the oil waste storage area: a) platform No. 1; b) platform No²; c) platform No³; d) platform No4

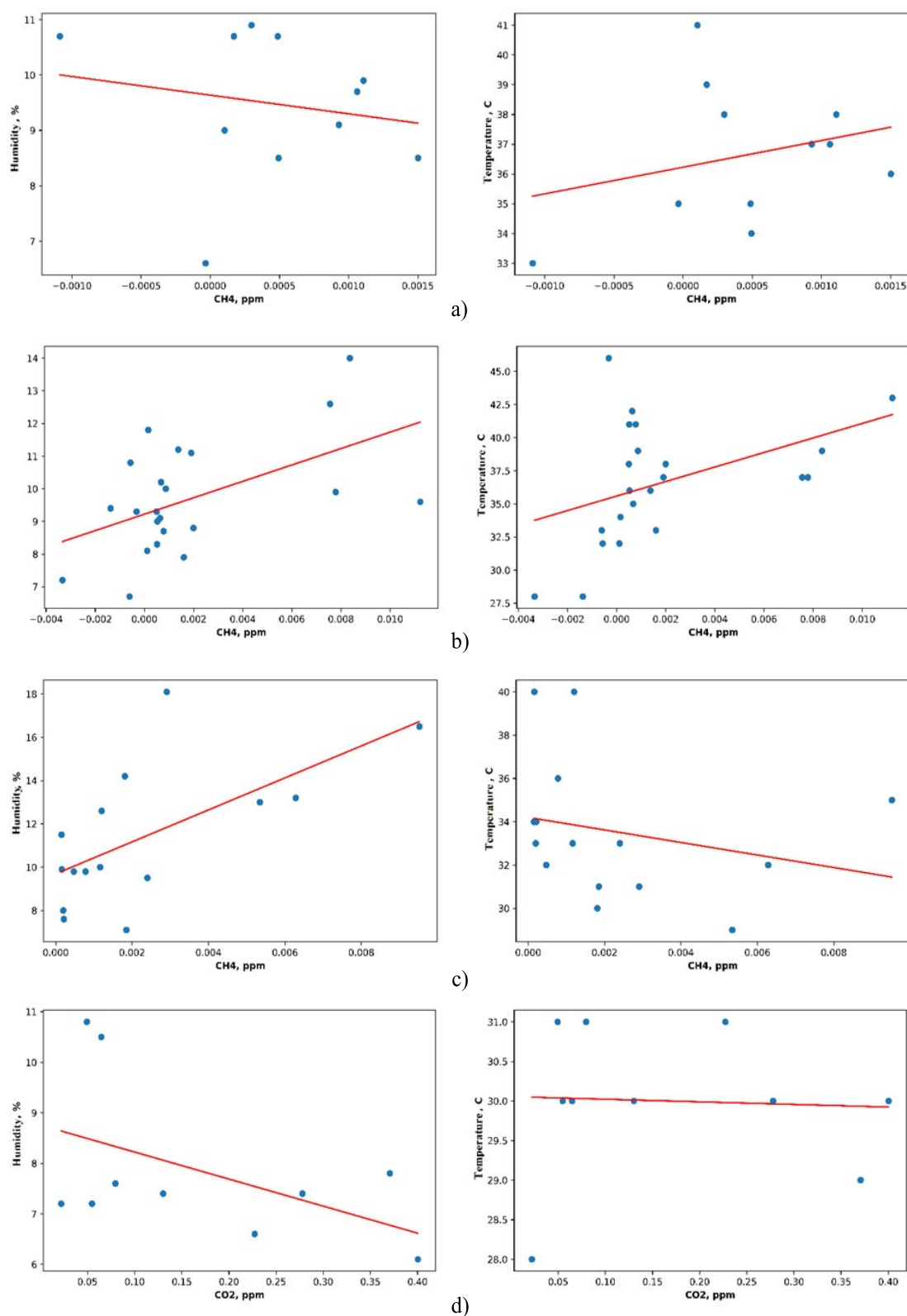


Рис. 5. Зависимость эмиссии метана от температуры и влажности поверхности почвы на участке хранения нефтеотходов: а) площадка №1; б) площадка №2; в) площадка №3; д) площадка №4 /

Fig. 5. Dependence of methane emission on the temperature and humidity of the soil surface at the oil waste storage area: a) platform No1; b) platform No2; c) platform No3; d) platform No4

Вместе с тем, при планировании опыта с позиций декарбонизации и сохранения углерода нефти в почве, предполагалось, что использование укрывного материала позволит направить трансформацию нефтяного углерода в почвенное органическое вещество за счет восстановительных анаэробных процессов. Иными словами, позволит качественно изменить состав загрязнения и накопить в почве органический углерод, потенциально определяющий и последующий синтез гуминовых соединений.

В коротком лабораторном опыте сложно ожидать гумификации углеводородов нефти в почвенное органическое вещество, объективно такая возможность будет в полевом опыте в следующие годы наблюдений. Но оценить интенсивность трансформации нефтяных углеводородов в углекислый газ возможность была. На рисунке 7 представлена динамика выделения CO_2 в опытных вариантах за 2 месяца опыта.

В контрольной почве дыхательная активность была слабо выражена и мало отличалась от почвы начала опыта. Это свидетельствует о том, что собственный потенциал самовосстановления субстрата крайне мал. Этого и следовало ожидать после длительного хранения нефтешлама на исследуемых площадках под плотной коркой и после предварительного термического воздействия.

Внесение в опытный субстрат МБК-А, гумата, соломы и БП-Т способствовало довольно быстрой интенсификации биологических процессов, в том числе разрушению углеводородов, что привело к значительному росту выделения CO_2 из почвы. Это было ожидаемо – солома выступила в качестве разрыхлителя и почвоулучшителя, БП-Т – интенсифицировал разрушение целлюлозы в составе соломы

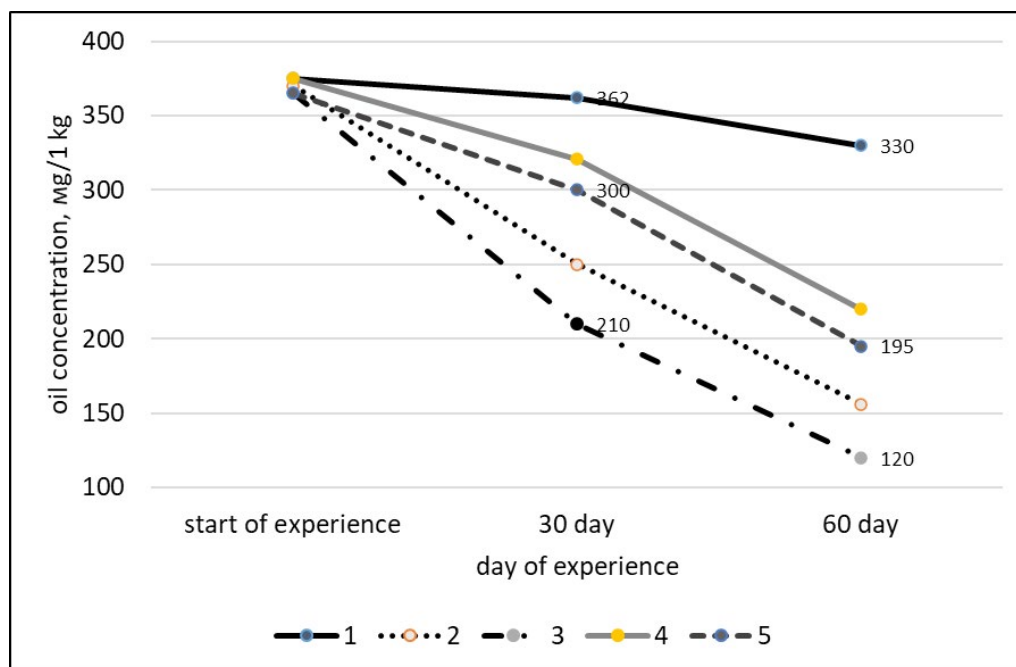


Рис. 6. Динамика концентрации углеводородов (мг/кг) в почве лабораторного опыта: 1 – Контроль, 2 – МБК-А+гумат, 3 – МБК-А+гумат+солома+БП-Т; 4 – МБК-А+гумат (под пленкой), 5 – МБК-А+гумат+солома+БП-Т (под пленкой) /

Fig. 6. Dynamics of hydrocarbon concentration (mg/kg) in the soil of the laboratory experiment: 1 – Control, 2 – MBK-A + humate, 3 – MBK-A + humate + straw + BP-T; 4 – MBK-A + humate (under the film), 5 – MBK-A + humate + straw + BP-T (under the film)

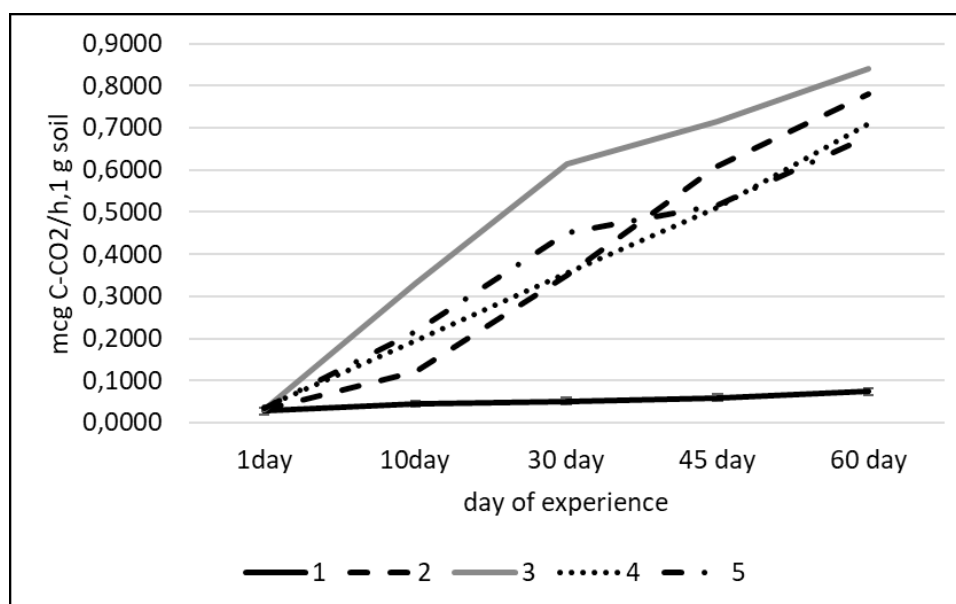


Рис. 7. Интенсивность выделения CO_2 в почве опытных вариантов: 1 – Контроль, 2 – МБК-А+гумат, 3 – МБК-А+гумат+солома+БП-Т; 4 – МБК-А+гумат (под пленкой), 5 – МБК-А+гумат+солома+БП-Т (под пленкой) /

Fig. 7. The intensity of CO_2 release in the soil of experimental variants: 1 – Control, 2 – MBK-A + humate, 3 – MBK-A + humate + straw + BP-T; 4 – MBK-A + humate (under the film), 5 – MBK-A + humate + straw + BP-T (under the film)

и способствовал накоплению простых углеводов в почве. Это в свою очередь дало дополнительный стимул к развитию микробиоты.

МБК-А в свою очередь выступил в качестве эффективного нефтедеструктора. В почве варианта 2 (полоса 2), без соломы, то есть без разрыхлителя, но с нефтедеструктором разгонка почвенного дыхания происходила медленнее, тем не менее к концу второго месяца опыта по скорости выделения CO_2 вариант приблизился к варианту 3 (полоса 3). Укрытие почвы пленкой снижало доступность кислорода воздуха к почве. Это отразилось на скорости выделения углекислого газа, но оба варианта с укрывным материалом, тем не менее, характеризовались постепенным возрастанием интенсивности дыхания почвы.

Выводы

Полевые наблюдения 2022 года и лабораторные исследования нефтешлама на нефтезагрязненном участке территории бывшего Новогрозненского НПЗ им. Н. Анисимова позволяют заключить следующее. В результате выжигания нефтешлама образовалась плотная корка на поверхности шламонакопителей, что способствовало торможению биологических процессов очищения грунтов от нефтепродуктов. Несмотря на это, интенсивность эмиссии парниковых газов (метана и углекислого газа) активизируется при увеличении влажности воздуха, которая в свою очередь увеличивает пористость почвы на исследуемой поверхности. Увеличение температуры окружающей среды приводит к пропорциональному усилению эмиссии парниковых газов в случае нарушения целостности корки из сгоревших нефтепродуктов и грунта. Это определяет объекты хранения нефтеотходов на рассматриваемом участке как потенциально опасные для воздушной среды.

В рамках разработки и обоснования технологий ликвидации участков хранения нефтеотходов разработан экспериментальный биоконсорциум для биологической деструкции углеводородов в составе нефтешлама участка территории бывшего Новогрозненского НПЗ им. Н. Анисимова. Заложен полевой опыт для оценки интенсивности эмиссии парниковых газов при использовании методов биостимулирования нефтеокисления и методов декарбонизации с сохранением и последующей трансформацией нефтеуглеводородов в почвенное органическое вещество. Лабораторные исследования показали, что обработка почвы экспериментальным биоконсорциумом МБК-А усиливает интенсивность почвенного дыхания, ускоряет очищение грунта от углеводородов на 55-58% за 2 месяца, использование соломы в качестве структуратора наряду с МБК-А стимулирует очищение с еще большей скоростью – до 67% за 2 месяца. Использование укрывного материала замедляет почвенное дыхание и снижает скорость трансформации углеводородов с использованием МБК-А с соломой и без нее. Однако, именно данный прием (применение укрывного материала) может стать наиболее перспективным для улучшения и восстановления почвенного плодородия впоследствии за счет процессов трансформации нефтеуглеводородов в почвенную органику. Для подтверждения (или опровержения) полученных в лаборатории результатов необходимы результаты исследований на реальных объектах. Полевые исследования заложенных площадок в соответствии с планом работ активно будут продолжены с весны 2023 года. На основании полученных результатов планируется разработка предложений по биорекультивации нефтезагрязненных почв путем трансформации нефтеуглеводородов в почвенное органическое вещество.

Литература

1. Керимов И. А., Гайрабеков У. Т., Махмудова Л. Ш. Карбоновый полигон Чеченской Республики: I. Ландшафтные особенности и структура. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2021. – Т. 6. № 3 (25). – С. 35-47.
2. Керимов И. А., Махмудова Л. Ш., Мячина К. В. Карбоновый полигон Чеченской Республики: Ландшафтные особенности и методы исследований. // В сб.: I International scientific conference, 12-16 september 2022. Landscape dimensions of sustainable development science – car. – Тбилиси: Тбилисский государственный университет им. И. Джавахишвили, 2022. – С. 113-119.
3. Керимов И. А., Эзирбаев Т. Б. Использование мультиспектральной съемки при наблюдении за состоянием лесного покрова Земли. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12 (3). – С. 182-194. DOI: 10.46698/VNC.2022.58.33.001
4. Коршунова Т. Ю., Логинов О. Н. Опыт применения консорциума микроорганизмов деструкторов углеводородов для обезвреживания нефтеотходов. // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 614.
5. Литвинова Т. А. Современные способы обезвреживания и утилизации нефтесодержащих отходов для ликвидации загрязнения окружающей среды. // Научный журнал КубГАУ. – 2016. – № 123 (09). URL: <http://ej.kubagro.ru/2016/09/pdf/62.pdf>
6. Маркарова М. Ю., Шейнфельд С. А., Надежкин С. М., Анчугова Е. М., Щемелинина Т. Н. Экологические аспекты переработки нефтешламов и рекультивации нефтешламовых амбаров. // Экологический вестник России. – 2016. – № 10. – С. 13–22.
7. Методы стационарного изучения почв. – М.: Наука, 1977. – 296 с.
8. Микроорганизмы и охрана почв. / Под ред. Д. Г. Звягинцева. – М.: МГУ, 1989. – 206 с.
9. Мильман П. Ю., Гильванова Е. А. Paenibacillusehimensis IB-739 в биodeградации нефтяных шламов. // Экология и промышленность России. – 2014. – № 11. – С. 54-56.

10. Оборин А. А., Хмурчик В. Т., Иларионов С. А., Маркарова М. Ю., Назаров А. В. Нефтезагрязненные биогеоценозы (процессы образования, научные основы восстановления, медико-экологические проблемы. Пермь: Пермский государственный университет, 2008. – 511 с.
11. Огильви А. А. Основы инженерной геофизики. – М.: «Недра», 1990. – 501 с.
12. Паников Н. С. Математическое моделирование роста микроорганизмов в почве. // Науч. докл. высшей школы. Биол. науки. – 1988. – № 2. – С. 58-66.
13. Попов М. Г., Попова О. Г. Возможность комплексного изучения геологической среды при сейсмозоологическом мониторинге в районах повышенной экологической опасности. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11 (2). – С. 152-166. DOI: 10.46698/VNC.2021.29.52.011
14. Соколов Л. И. Переработка и утилизация нефтесодержащих отходов. – М.: Инфра-Инженерия, 2017. – 160 с.
15. Соловьянов А. А. Переработка нефтешламов с использованием химических и биологических методов. // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2012. – № 5. – С. 30-39.
16. Хуснутдинов И. Ш., Сафиулина А. Г., Заббаров Р. Р., Хуснутдинов С. И. Методы утилизации нефтяных шламов. // Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58. № 10. – С. 3-20.
17. Черных М. С., Садчиков А. В. Нефтедеструкция и биоремедиация. // Современные проблемы науки и образования. – 2016. – № 5. – С. 309.
18. Bezza F.A., Beukes M., Chirwa E.M. N. Application of biosurfactant produced by *Ochrobactrum intermedium* CN3 for enhancing petroleum sludge bioremediation. // Proc. Biochem. – 2015. – Vol. 50. No. 11. – pp. 1911-1922.
19. Bhattacharya M., Biswas D., Sana S., Datta S. Biodegradation of waste lubricants by a newly isolated *Ochrobactrum* sp. C1. // 3 Biotech. – 2015. – Vol. 5. No. 5. – pp. 807-817.
20. Koshlaf E., Ball A. S. Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments. // AIMS Microbiol. – 2017. – Vol. 3. No. 1. – pp. 25-49.
21. Nasreen Z., Kalsoom S. Biodegradation of petroleum industry oily sludge and its application in land farming: a review. // Int. J. Environment and Waste Management. – 2018. – Vol. 21. No. 1. – pp. 37-57.
22. Romero-Ruiz A., Linde N., Keller T., Or D. A Review of Geophysical Methods for Soil Structure Characterization. // J. Reviews of Geophysics. – 2018. – Vol. 56. Iss. 4. – pp. 672-696.
23. Sarkar D., Ferguson M., Datta R., Birnbaum S. Bioremediation of petroleum hydrocarbons in contaminated soils: comparison of biosolids addition, carbon supplementation, and monitored natural attenuation. // Environ. Pollut. – 2005. – Vol. 136. – pp. 187-195.
24. Khan F. I., Husain T., Hejazi R. An overview and analysis of site remediation technologies. // J. Environ. Manage. – 2004. – Vol. 71. – pp. 95-122.

References

1. Kerimov I.A., Gairabekov U.T., Makhmudova L. Sh. Carboniferous polygon of the Chechen Republic: I. Landscape features and structure. Grozny Bulletin of Natural Sciences. 2021. Vol. 6. No. 3 (25). pp. 35-47. (In Russ.)
2. Kerimov I.A., Makhmudova L. Sh., Myachina K. V. Carbon polygon of the Chechen Republic: Landscape features and research methods. II International scientific conference 12-16 september 2022. Landscape dimensions of sustainable development science – car. GIS-planning-governance. Tbilisi. Ivane Javakhishvili Tbilisi State University Press. 2022. pp. 113-119. (In Russ.)
3. Kerimov I.A., Ezirbaev T.B. The use of multispectral imaging in monitoring the state of the Earth's forest cover. Geology and geophysics of the South of Russia. 2022. Vol. 12 (3). pp. 182-194. DOI: 10.46698/VNC.2022.58.33.001 (In Russ.)

4. Korshunova T. Yu., Loginov O. N. Experience in the use of a consortium of microorganisms destructors of hydrocarbons for the disposal of oil waste. Modern problems of science and education. 2014. No. 3. URL: <http://www.science-education.ru/117-13407>. (In Russ.)
5. Litvinova T. A. Modern methods of neutralization and disposal of oily waste to eliminate environmental pollution/ Scientific journal of KubSAU. 2016. No. 123 (09). URL: <http://ej.kubagro.ru/2016/09/pdf/62.pdf>. (In Russ.)
6. Markarova M. Yu., Sheinfeld S. A., Nadezhkin S. M., Anchugova, E. M., Schemelinina T. N. Ecological aspects of oil sludge processing and reclamation of oil sludge pits. Ecological Bulletin of Russia. 2016. No. 10. pp. 13–22. (In Russ.)
7. Methods for stationary study of soils. Moscow. Science. 1977. 296 p. (In Russ.)
8. Microorganisms and soil protection. Ed. D. G. Zvyagintsev. Moscow. Moscow State University. 1989. 206 p. (In Russ.)
9. Milman P. Yu., Gilvanova E. A. *Paenibacillus* IB-739 in the biodegradation of oil sludge. Ecology and Industry of Russia. 2014. No. 11. pp. 54–56. (In Russ.)
10. Oborin A. A., Khmurchik V. T., Ilarionov S. A., Markarova M. Yu., Nazarov A. V. Oil-contaminated biogeocenoses (formation processes, scientific foundations of recovery, medical and environmental problems. Perm. Perm State University. 2008. 511 p. (In Russ.)
11. Ogilvi A. A. Fundamentals of engineering geophysics. Moscow. Nedra. 1990. 501 p. (In Russ.)
12. Panikov N. S. Mathematical modeling of the growth of Microorganisms in the soil. scientific. report higher school. Biol. science. 1988. No. 2. pp. 58–66. (In Russ.)
13. Popov M. G., Popova O. G. The possibility of a comprehensive study of the geological environment during seismo-ecological monitoring in areas of increased environmental hazard. Geology and geophysics of the South of Russia. 2021. Vol. 11 (2). pp. 152–166. DOI: 10.46698/VNC.2021.29.52.011 (In Russ.)
14. Sokolov L. I. Processing and disposal of oily waste. Moscow. InfraEngineering. 2017. 160 p. (In Russ.)
15. Solov'yanov A. A. Processing of oil sludge using chemical and biological methods. Environmental protection in oil and gas complex. 2012. No. 5. pp. 30–39. (In Russ.)
16. Khusnutdinov I. Sh., Safiulina A. G., Zabbarov R. R., Khusnutdinov S. I. Methods for the disposal of oil sludge. Chemistry and chemical technology. 2015. Vol. 58. No. 10. pp. 3–20. (In Russ.)
17. Chernykh M. S., Sadchikov A. V. Oil destruction and bioremediation. Modern problems of science and education. 2016. No. 5. p. 309. (In Russ.)
18. Bezza F. A., Beukes M., Chirwa E. M. N. Application of biosurfactant produced by *Ochrobactrum intermedium* CN3 for enhancing petroleum sludge bioremediation. Proc. Biochem. – 2015. Vol. 50. No. 11. pp. 1911–1922.
19. Bhattacharya M., Biswas D., Sana S., Datta S. Biodegradation of waste lubricants by a newly isolated *Ochrobactrum* sp. C1.3 Biotech. 2015. Vol. 5. No. 5. pp. 807–817.
20. Koshlaf E., Ball A. S. Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments. AIMS Microbiol. 2017. Vol. 3. No. 1. pp. 25–49.
21. Nasreen Z., Kalsoom S. Biodegradation of petroleum industry oily sludge and its application in land farming: a review. Int. J. Environment and Waste Management. 2018. Vol. 21. No. 1. pp. 37–57.
22. Romero-Ruiz A., Linde N., Keller T., Or D. A Review of Geophysical Methods for Soil Structure Characterization. J. Reviews of Geophysics. 2018. Vol. 56. Iss. 4. pp. 672–696.
23. Sarkar D., Ferguson M., Datta R., Birnbaum S. Bioremediation of petroleum hydrocarbons in contaminated soils: comparison of biosolids addition, carbon supplementation, and monitored natural attenuation. Environ. Pollut. 2005. Vol. 136. pp. 187–195.
24. Khan F. I., Husain T., Hejazi R. An overview and analysis of site remediation technologies. J. Environ. Manage. 2004. Vol. 71. pp. 95–122.

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК: 504.064.36

DOI: [10.46698/VNC.2022.37.95.013](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.37.95.013)

Оригинальная статья

Оценка воздействия отходов обогащения медных руд на поверхностные и подземные воды

Р. Р. Нуреев , М. А. Пашкевич , П. А. Харько 

Санкт-Петербургский горный университет, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург,
Васильевский остров, 21 линия, д. 2, e-mail: nureev_rr@mail.ru

Статья поступила: 21.09.2022, доработана: 24.10.2022, принята к публикации: 02.11.2022

Резюме: Актуальность работы. Отходы производства в промышленно развитых регионах значительно влияют на современное состояние малых рек. Первостепенную роль в загрязнении поверхностных водотоков играет инфильтрация кислых подотвальных сточных вод. Кислые дренажные воды содержат в своем составе аномальные концентрации таких металлов как медь, цинк, железо, марганец и др. В кислой водной среде металлы находятся в растворенной форме и могут мигрировать на значительные расстояния, загрязняя поверхностные водотоки и подземные воды и в реакции нейтрализации переходят в нерастворимую форму, накапливаясь в донных отложениях. **Цель исследования.** Оценка состояния природных вод и донных отложений руч. Рыжий и р. Сак-Элга с учетом негативного воздействия инфильтрационных вод хвостохранилищ. **Методы исследования.** Массовые концентрации металлов в пробах воды определялись методом количественного химического анализа при помощи атомно-эмиссионного спектрометра ICPE-9000. Валовые концентрации элементов в пробах донных отложений исследовались согласно методике МВИ-80-2008 «Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии». **Результаты работы.** В статье представлены результаты мониторинговых исследований количественного химического состава ручья Рыжий и реки Сак-Элга, по итогам которых была проведена оценка влияния инфильтрационных вод хвостохранилищ предприятия АО «Карашмедь» на компоненты гидросферы. Отмечено, что вне зоны влияния отходов обогащения природная вода характеризуется как слабощелочная среда, а ее pH равен приблизительно 7,5, а после впадения в реку ручья Рыжий, формируемого дренажными водами хвостохранилища №3, pH воды снижается до значений 4-5. Далее по течению реки находится хвостохранилище №4, инфильтрационные воды которого снижают pH воды до 3-3,5. В статье приведены результаты мониторинга окружающей среды, включающие в себя отбор проб воды и донных отложений ручья Рыжий и реки Сак-Элга, пробоподготовку и количественный анализ состава проб. Было установлено, что в зоне влияния хвостов обогащения медных руд присутствуют значительные превышения предельно допустимых концентраций по ряду элементов. В статье отмечено, что разработка мероприятий по изъятию и вторичной переработке отходов горно-обогатительных производств позволит значительно снизить техногенное влияние на поверхностные водотоки.

Ключевые слова: малые реки, Урал, металлургическая промышленность, горноперерабатывающая промышленность, загрязнение рек, тяжелые металлы, хвостохранилище.

Для цитирования: Нуреев Р. Р., Пашкевич М. А., Харько П. А. Оценка воздействия отходов обогащения медных руд на поверхностные и подземные воды. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (4): 169-179. DOI: [10.46698/VNC.2022.37.95.013](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.37.95.013).

DOI: [10.46698/VNC.2022.37.95.013](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.37.95.013)

Original paper

Assessment of the impact of copper ore processing waste on surface and groundwater

R. R. Nureev , M. A. Pashkevich , P. A. Kharko 

St. Petersburg Mining University, 221st Line, St Petersburg 199106, Russian Federation,
e-mail: nureev_rr@mail.ru

Received: 21.09.2022, revised: 24.10.2022, accepted: 02.11.2022

Abstract. Relevance. Production waste in industrially developed regions significantly affects the current state of small rivers. The primary role in the pollution of surface watercourses is played by the infiltration of acidic sub-basement wastewater. Acidic drainage waters contain abnormal concentrations of metals such as copper, zinc, iron, manganese, etc. In an acidic aqueous medium, metals are in a dissolved form and can migrate over considerable distances, polluting surface watercourses and groundwater, and in the neutralization reaction they pass into an insoluble form, accumulating in bottom sediments. **Aim.** Assessment of the state of natural waters and bottom sediments of the stream. Ryzhy and the Sak-Elga river, taking into account the negative impact of infiltration waters of tailings dumps. **Methods.** Mass concentrations of metals in water samples were determined by quantitative chemical analysis using an atomic emission spectrometer ICPE-9000. Gross concentrations of elements in samples of bottom sediments were studied according to the MVI-80-2008 methodology "Methodology for measuring the mass fraction of elements in samples of soils, soils and bottom sediments by atomic emission and atomic absorption spectrometry". **Results.** The article presents the results of monitoring studies of the quantitative chemical composition of the Ryzhy Creek and the Sak-Elga River, which resulted in an assessment of the influence of infiltration waters of the tailings storage facilities of the Karabashmed JSC enterprise on the components of the hydrosphere. It is noted that outside the zone of influence of enrichment waste, natural water is characterized as a slightly alkaline medium, and its pH is approximately 7.5, and after the confluence of the Ryzhy Stream formed by the drainage waters of the tailings dump No. 3, the pH of the water decreases to values 4-5. Further downstream is the tailings pond No. 4, the infiltration waters of which reduce the pH of the water to 3-3.5. The article presents the results of engineering and environmental surveys, including sampling of water and sediments of the Ryzhy Creek and the Sak-Elga River, sample preparation and quantitative analysis of the composition of samples. It was found that in the zone of influence of the tailings of copper ore enrichment there are significant exceedances of the maximum permissible concentrations for a number of elements. The article notes that the development of measures for the removal and recycling of waste from mining and processing industries will significantly reduce the anthropogenic impact on surface watercourses.

Keywords: small rivers, Ural, metallurgical industry, mining industry, river pollution, heavy metals, tailings storage.

For citation: Nureev R. R., Pashkevich M. A., Kharko P. A. Assessment of the impact of Copper Ore Enrichment Waste on Surface and Groundwater. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (4): 169-179. DOI: [10.46698/VNC.2022.37.95.013](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.37.95.013).

Введение

На территории Российской Федерации порядка половины от общего объема речного стока формируется так называемыми малыми реками – реками, имеющими длину не более ста километров и площадь водосбора не более двух тысяч квадратных километров. Процесс самовосстановления таких поверхностных водотоков занимает гораздо больше времени, чем в больших и средних реках. Негативное ан-

тропогенное воздействие на малые поверхностные водотоки приводит к усиленной деградации водной экосистемы, которая выражается в заиливании, ускоренному накоплению донных отложений, формированию техногенных наносов [Пашкевич и др., 2020; Ткачев, Булатов, 2002]. Проблеме исследований состояния малых водотоков посвящено множество работ, ей уделяется значительное внимание при проектировании природоохранных мероприятий по снижению негативного воздействия промышленных предприятий на водные объекты [Пашкевич, Харько, 2022; Мережко, 1998].

Однако, вопрос поиска эффективного и целесообразного, с эколого-экономической точки зрения, способа ликвидации накопленного экологического вреда в районе деятельности рудоперерабатывающих предприятий, остается нерешенным [Kuznetsov, Petrov, 2017; Matveeva et al., 2019].

Данная статья посвящена вопросу оценки техногенного воздействия на компоненты гидросферы отходов обогащения медных руд и является частью диссертационных исследований авторов.

В настоящий момент Урал является одним из крупнейших горнопромышленных регионов России и мира [Lytaeva, Isakov, 2017; Minkina et al., 2018]. Разработка медноколчеданных месторождений в этой области ведется с 1635 г., и за более чем трехсотлетнюю историю добычи в этом районе сформировались колоссальные техногенные массивы – насыпные и намывные массивы, техногенные наносы – включающие отходы различного генезиса и исчисляемые миллионами тонн [Сударинов и др., 2022; Rumynin et al., 2021].

Ярким примером формирования служат техногенные массивы Карабашского медеплавильного комбината (в настоящий момент – АО «Карабашмедь»), градообразующего предприятия г. Карабаш, расположенного на северо-западе Челябинской области, и специализирующегося на переработке концентрата медно-колчедановых руд [Корнилова, 2018; Курбатова, 2020].

Предприятие располагается в районе бассейна р. Сак-Элга, относящейся к I рыбохозяйственной категории. Данный поверхностный водоток классифицируется как малая река и является ключевым звеном в привнесении элементов в такие поверхностные водоемы как пр. Богородский и р. Миасс с последующим впадением в Аргазинское водохранилище [Минкина и др., 2013].

Русло р. Сак-Элга было преобразовано в связи с созданием хвостохранилища №4, которое находится в юго-восточном направлении от предприятия АО «Карабашмедь» (рис. 1). Ширина его варьируется от 2 до 10 м с разливами до 25 метров; питается река природными подземными, а также техногенными подотвальными водами: в нее впадают водоотводные каналы и выпуски сточных вод. Вдоль русла реки, протекающей в границах промагломации, расположены источники негативного воздействия различного характера: карьерные выемки, хвостохранилище, отвалы пустых пород (рис. 1) [Губанов, 2022; Калабин и др., 2011].

Состав воды водотока определяется составом подотвальных и карьерных вод, инфильтрационных вод хвостохранилища, а также техногенными барьерами реки, на которых происходит преобразование части элементов в нерастворенную фазу [Реутова и др., 2021].

В двух километрах от Богородского пруда, в р. Сак-Элга впадает ручей Рыжий, берущий свое начало из-под насыпных техногенных массивов (отвалов хвостов обогащения) фабрики обогащения предприятия АО «Карабашмедь» и дренирующий подотвальные воды. Ручей несет в себе сильнокислые воды – в точке № 1 (рис. 1) pH

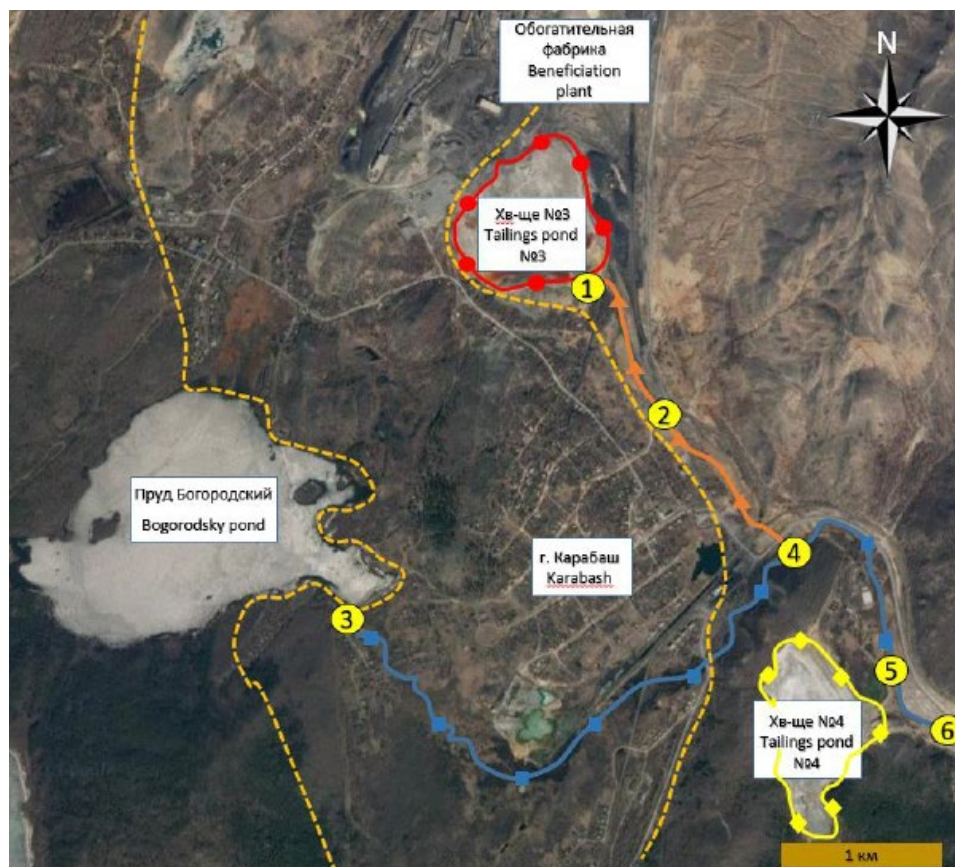


Рис. 1. Карта отбора проб воды и донных отложений. /

Fig. 1. Water and sediment sampling map

- — граница хвостохранилища № 3 / tailing spond boundary № 3;
- ◆ — граница хвостохранилища № 4 / tailing spond boundary № 4;
- — граница реки Сак-Элга / the border of the Sak-Elgariver;
- ▲ — граница ручья Рыжий / border of the Red creek;
- — граница города Карабаш / the border of the city of Karabash;
- — точки отбора проб воды и донных отложений / sampling points

воды составляет 3–3,5. В точке смешения водотоков руч. Рыжий и р. Сак-Элга отмечается значительное ухудшение качества речной воды: качественный состав воды в летний период времени схож с составом дренажных вод хвостохранилищ № 3 и № 4. Это объясняется высокой температурой в летнее время года и обмелением реки на трансформированном русле реки у хвостохранилища № 4, вследствие чего кислый дренажный сток от хвостохранилищ начинает преобладать по объему. Содержание металлов в составе речной воды напрямую зависит от водородного показателя (pH) водной среды. В руч. Рыжий и в точке его впадения в р. Сак-Элга концентрации металлов максимальны при низких значениях pH (3–3,5 единицы). Превышение фоновых концентраций по металлам на этом участке варьируется от 10 до 1000 раз. Концентрации металлов снижаются по дальнейшему течению реки и повышению уровня pH, однако, коэффициенты контрастности отличаются достаточно высоким уровнем [Ульрих и др., 2015; Бардамова, 2018]. Наличие таких аномальных концентраций металлов в речных водах, при проникновении в почвы, влечет за собой гибель фито- и биоценозов [Bortnikova et al., 2005; Yurkevich et al., 2015].

Совокупность вышеуказанных факторов свидетельствует о необходимости снижения техногенной нагрузки на элементы гидросферы промагломерации г. Карабаш и проведения мониторинговых исследований природной воды и донных отложений.

Цель исследования: Оценка состояния природных вод и донных отложений руч. Рыжий и р. Сак-Элга.

Объект исследования: Пробы речной воды и донных отложений руч. Рыжий и р. Сак-Элга, а также Богородского пруда. В ходе работы проведены полевые и лабораторные исследования проб воды и донных отложений.

При проведении экологических изысканий были отобраны пробы воды и донных отложений в 6 точках:

точка № 1 – начало формирования ручья Рыжий, хвостохранилище № 3;

точка № 2 – участок ручья, находящийся в непосредственной близости от населенного пункта;

точка № 3 – район, находящийся вне зоны влияния техногенных массивов обогатительной фабрики;

точка № 4 – участок реки, находящийся в месте смешения реки с ручьем, содержащий подотвальные воды;

точка № 5 – участок реки в зоне влияния хвостохранилища № 4;

точка № 6 – участок реки после техногенных массивов предприятия.

Методы исследований

Отбор проб воды производился батометром Паталаса из нержавеющей стали в летний период (август 2020) в соответствии с «ГОСТ 31861–2012 Вода. Общие требования к отбору проб».

Отбор проб донных отложений производился бентосным дночерпателем в летний период (август 2020) в соответствии с «ГОСТ 17.1.5.01-80 Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность».

После отбора, пробы воды были отфильтрованы, законсервированы и хранились в полиэтиленовых герметичных емкостях объемом 0,5 дм³.

Пробы донных отложений были помещены в герметичные пакеты из полиэтилена для дальнейшей транспортировки.

Отобранные пробы были охлаждены сразу после отбора до температуры +4°C, и в дальнейшем транспортировались в холодильных ящиках.

Дальнейшая пробоподготовка проводилась в лаборатории на базе НОЦКП «ЦКП» Санкт-Петербургского горного университета.

Определение катионов металлов в пробах воды проводилось с помощью оптического эмиссионного спектрометра ICPE-9000.

Для измельчения проб донных отложений использовалась шаровая мельница. Далее подготовленную пробу исследовали на валовое содержание элементов, а также на наличие подвижных и водорастворимых форм. Анализ концентраций тяжелых металлов в донных отложениях проводился на оптическом эмиссионном спектрометре ICPE-9000.

Определение валовых содержаний элементов производилось согласно методике МВИ-80-2008 «Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии».

Результаты работы и их обсуждение

Результаты анализа проб воды на катионы металлов представлены в таблице 1. Коэффициенты контрастности рассчитаны на основании Приказа Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. N552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

Таблица 1 / Table 1

Массовая концентрация металлов, мг/дм³. / Mass concentration of metals, mg/dm³

Проба / Sample	Ca	К конт. / Contrast ratio	Fe	К конт. / Contrast ratio	Mg	К конт. / Contrast ratio	Na	К конт. / Contrast ratio
1	520	2,8	1460	14600	783	19575	155	0,8
2	67	0,4	15,1	151	69	1,7	234	1,9
3	99	0,5	2,4	24	27	0,7	164	1,4
4	59	0,3	1,6	16	22	0,5	65	0,5
5	148	0,8	42	420	160	4	56	0,4
6	519	2,8	855	8550	650	16,2	189	1,6
Проба / Sample	Cu	К конт. / Contrast ratio	Zn	К конт. / Contrast ratio	Mn	К конт. / Contrast ratio	Sr	К конт. / Contrast ratio
1	61	61000	153	15300	58	5800	1,7	4,2
2	0,9	900	3,9	390	3,2	320	0,3	0,7
3	1,2	1200	0,4	40	0,9	90	0,2	0,5
4	0,7	700	0,1	10	0,1	10	0,2	0,5
5	1,9	1900	6,5	650	6,6	660	0,4	1
6	52	52000	138	13800	61	6100	3,3	8,25

Результаты анализа проб донных отложений представлены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Валовое содержание элементов на абсолютно сухое состояние, мг/кг. / Gross content of elements on absolutely dry state, mg/kg.

Проба / Sample	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	V	Zn
1	484,4	96,5	15,5	14,6	21,2	1459,5	59,1	55,9	38,3	1439,0
2	473,1	2970	21,1	21,1	651,4	1095,8	730,8	176,4	102,9	1935,4
3	1426,4	6503,7	61,1	64,1	214,2	2208,4	2912,9	237,5	78,5	6848,6
4	789	3003,5	16,5	94	319,2	680,9	12838,4	219,0	125,8	7360,4
5	352,2	576,7	6,8	18,8	484,1	810,3	597,1	150,7	90,0	993,0
6	1167,9	435,8	9,2	1	116,6	1185,4	159,9	72,7	58,3	1887,2

Результаты анализа проб донных отложений на подвижные формы металлов представлены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Содержание подвижных форм металлов на абсолютно сухое состояние, мг/кг.
/ **The content of mobile forms of metals in an absolutely dry state, mg/kg.**

Проба / Sample	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Fe	Zn
1	49,3	18,7	1,7	2,59	70,1	16,2	3,23	8240,5	73,1
2	14,9	384,9	4,6	12,2	336,0	95,2	9,96	19078,1	814,3
3	1323,6	101,4	41,5	13,3	1997,4	2875,8	128,1	77129,0	5757,6
4	68,1	180,5	16,0	9,7	613,4	6620,9	116,3	21266,3	4908,1
5	25,0	50,1	1,2	8,4	199,6	45,6	6,46	5640,6	99,8
6	172,8	22,6	4,4	6,7	86,4	28,0	6,38	20650,9	72,3

Результаты анализа проб донных отложений на водорастворимые формы металлов представлены в таблице 4.

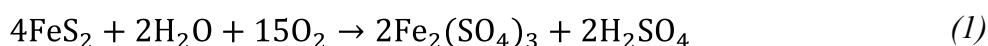
Таблица 4 / Table 4

Содержание водорастворимых форм металлов на абсолютно сухое состояние, мг/кг. / The content of water-soluble forms of metals on an absolutely dry state, mg/kg.

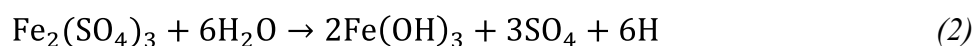
Проба / Sample	K	Ba	Cd	Sr	Cu	Mn	Ni	Fe	Zn
1	5,5	0,7	0,2	0,7	55,9	15,9	0,8	317,6	72,2
2	14,4	0,5	0,05	0,5	0,5	3,70	0,5	3,9	8,8
3	66,2	0,5	1,2	6,2	1,5	714,2	9,4	4,9	691,3
4	73,5	0,5	0,1	1,4	1,2	8,3	0,5	30,4	6,4
5	4,7	0,5	0,1	0,7	59,1	22,4	2,7	12,8	31,3
6	4,2	0,8	0,2	0,6	41,6	18,9	1,1	166,6	56,4

Результаты анализов позволили выявить аномальные превышения предельно допустимых концентраций в точках 1, 5 и 6. Это объясняется непосредственной близостью точек отбора проб к местам накопления отходов обогащения, инфильтрационные воды которых вносят значительный вклад в загрязнение поверхностных водотоков, определяя их химический состав.

Основным минералом хвостов обогащения является пирит (FeS_2), который при взаимодействии с атмосферными осадками и кислородом формирует сульфат железа и свободную серную кислоту (1):



В то же время сульфат железа, присутствуя в слабых растворах серной кислоты, гидролизуется с выделением основных сульфатов и переходит в гидроксид железа (2):



Стоит упомянуть, что за счет своего кислорода сульфат железа может окислять другие сульфаты, образуя свободную серную кислоту (3):



Наличие трехвалентного сульфата железа в кислой среде ведет к интенсификации процесса окисления пирита (4):



В результате разложения остаточного пирита в отходах обогащения предприятия Карабашмедь образуется раствор, содержащий свободную серную кислоту и трехвалентный сульфат железа [Tatsy, 2013; Abrosimova, Bortnikova, 2017].

Выводы

1. Произведена оценка степени воздействия кислых стоков отходов обогащения на поверхностные водотоки и подземные воды в зоне воздействия предприятия АО «Карабашмедь». Выполнен количественный анализ проб донных отложений и речной воды в зоне расположения хвостохранилищ. Выявлен механизм образования отложений.

2. Выполненные инженерные изыскания позволяют говорить о том, что в пробах воды и донных отложениях в зоне воздействия отходов обогащения наблюдаются значительные превышения ПДК по железу, меди, цинку и т.д. Осажденный гидроксид железа адсорбирует другие металлы, что приводит к еще большему загрязнению поверхностных водотоков и подземных вод.

3. Влияние металлургической промышленности приводит к значительному загрязнению рек. Разработка мероприятий по изъятию и вторичной переработке отходов обогащения позволит существенно понизить степень техногенного влияния на поверхностные водотоки в зоне воздействия предприятия.

Литература

1. Бардамова И.В. Изучение свойств геохимического барьера на основе известняка. // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Рациональное природопользование. Современное минералообразование: труды VII Всерос. симп. с междунар. участием и XIV Всерос. чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана. – Чита. – 2018. – С. 217-222.
2. Губанов Р.С. Оценка состояния водоохранных зон Центрального Предкавказья, на примере водных объектов Красногвардейского муниципального округа Ставропольского края при помощи методов дистанционного зондирования Земли. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12 (3). – С. 157-169. DOI: 10.46698/VNC.2022.95.62.011
3. Калабин Г.В., Титова А.В., Шаров А.В. Модернизация медеплавильного производства комбината ЗАО «Карабашмедь» и динамика состояния природной среды в зоне его влияния. // Маркшейдерия и недропользование. – 2011. – 65 с.
4. Корнилова В.А. Влияние месторождений полезных ископаемых на состояние окружающей среды (на примере г. Карабаш). // Актуальные вопросы публичного права. Материалы XVII Всероссийской научной конференции молодых ученых и студентов. В 2-х частях. – Екатеринбург: Уральский государственный юридический университет, 2018. – 278 с.
5. Курбатова С.А. Экологические проблемы Урала на примере антропогенного загрязнения территории Челябинской области в результате «Кыштымской аварии» и развития медеплавильного завода «Карабашмедь». // Международная научно-техническая конференция молодых ученых. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет, 2020. – С. 31-32.

6. Мережко А. И. Проблемы малых рек и основные направления их исследований. // Гидробиологический журн. – 1998 – Т. 34. № 6. – С. 66-71.
7. Минкина Т. М., Линник В. Г., Невидомская Д. Г. и др. Формы соединений тяжелых металлов в почвах зоны воздействия медеплавильного комбината «Карабашмедь». // Труды биогеохимической лаборатории. – 2013. – Т. 26. – С. 294-300. DOI:10.13140/2.1.3533.3767
8. Пашкевич М. А., Харько П. А. Применение композитной смеси для очистки кислых дренажных вод хвостового хозяйства от металлов. // Обогащение руд. – 2022. – № 4. – С. 40-47.
9. Пашкевич М. А., Бек Дж., Матвеева В. А., Алексеенко А. В. Биогеохимическая оценка состояния почвенно-растительного покрова в промышленных, селитебных и рекреационных зонах Санкт-Петербурга. // Записки Горного Института. – 2020. – Т. 241. – С. 125.
10. Реутова Н. В., Реутова Т. В., Дреева Ф. Р., Хутуев А. М. Микроэлементный состав поверхностных вод бассейна реки Малка и геохимические особенности региона. // Геология и геофизика Юга России. 2021. – Т. 11 (3): 172-184. DOI:10.46698/VNC.2021.20.60.014
11. Судариков С. М., Юнгмейстер Д. А., Королев Р. И., Петров В. А. О возможности уменьшения техногенной нагрузки на придонные биоценозы при добыче твердых полезных ископаемых с использованием технических средств различной модификации. // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 82-96. DOI: 10.31897/PMI. 2022.14
12. Ткачев Б. П., Булатов В. И. Малые реки: современное состояние и экологические проблемы. // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. – 2002. – № 64. – 114 с.
13. Ульрих Д. В., Брюхов М. Н., Тимофеева С. С. Влияние отходов обогатительной фабрики на водные объекты Челябинской области. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – Т. 4. – С. 13.
14. Abrosimova N., Bortnikova S. The Role of Anionogenic Elements (As, Sb, Mo, Se, S, P, N, Cl, F, C) in the Formation of Technogenic Geochemical Anomalies. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 95. Is. 4. No. 042024. DOI: 10.1088/1755-1315/95/4/042024
15. Bortnikova S. B., Bessonova E. P., Maximova N. V., Kolmogorov Yu. P., Ozherelyeva N. V., Bessonov D. Yu. Heavy metals in the region of deposited sulfide tailings: Distribution and ways of conservation (Karabash, South Ural). // Poverkhnost Rentgenovskie Sinkhronnye I Nejtronnnye Issledovaniya. – 2005. – Vol. 9. – pp. 25-29.
16. Kuznetsov V. S., Petrov D. S. Assessing the Environmental Condition of Minor Rivers in Urban Areas. // Journal of Ecological Engineering. – 2017. – Vol. 18 (6). – pp. 110-114. DOI: 10.12911/22998993/76221
17. Lytaeva T. A., Isakov A. E. Environmental impact of the stored dust-like zink and iron containing wastes. // Journal of Ecological Engineering. – 2017. – Vol. 18 (3). – pp. 37-42.
18. Matveeva V. A., Chukaeva M. A., Sverchkov I. P. Low-cost sorption technologies for large-tonnage wastewater treatment in mining industries. // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Conf. Ser. 1384. 012028. DOI:10.1088/1742-6596/1384/1/012028.
19. Minkina T. M., Linnik V. G., Nevidomskaya D. G. et al. Forms of Cu (II), Zn (II), and Pb (II) compounds in technogenically transformed soils adjacent to the Karabashmed copper smelter. // Journal of Soils and Sediments. – 2018. – Vol. 18. – pp. 2229-2230. DOI: 10.1007/s11368-017-1777-2
20. Rumynin V. G., Nikulenkova A. M., Rozov K. B., Vladimirov K. V., Erzova V. A. The status and trends in radioactive contamination of groundwater at a LLW-ILW storage facility site near Sosnovy Bor (Leningrad region, Russia). // Journal of Environmental Radioactivity. – 2021. – Vol. 237. – p. 106707. DOI: 10.1016/j.jenvrad. 2021.106707
21. Tatsy Y. G. Assessment of the Distribution of Heavy Metals around a Cu Smelter Town, Karabash, South Urals, Russia. // E3S Web of Conferences. – 2013. – Vol. 1. No. 19010. DOI: 10.1051/e3sconf/20130119010

22. Yurkevich N. V., Saeva O. P., Karin Y. G. Geochemical anomalies in two sulfide-bearing waste disposal areas: Fe, Cu, Zn, Cd, Pb, and As in contaminated waters and snow, Kemerovo and Chelyabinsk regions, Russia. // *Toxicological and Environmental Chemistry*. – 2015. – Vol. 97. – pp. 76-89. DOI: 10.1080/02772248.2015.1041955

References

1. Bardamova I. V. Study of the properties of a geochemical barrier based on limestone. In: *Proc. of VII All-Rus. symp. in memory of acad. A. E. Fersman*. Chita. 2018. pp. 217-222. (In Russ.)
2. 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 (3). pp. 157-169. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.95.62.011.
3. Kalabin G. V., Titova A. V., Sharov A. V. Modernization of the copper-smelting production of the CJSC Karabashmed and the dynamics of the state of the natural environment in the zone of its influence. *Mine surveying and subsoil use*. 2011. 65 p. (In Russ.)
4. Kornilova V. A. The influence of mineral deposits on the state of the environment (on the example of the city of Karabash). In: *Proc. of XVII All-Rus. sc. conf. Current issues of public law*. In 2 parts. Yekaterinburg, USLU. 2018. 278 p. (In Russ.)
5. Kurbatova S. A. Environmental problems of the Urals on the example of anthropogenic pollution of the territory of the Chelyabinsk region as a result of the “Kyshtym accident” and the development of the Karabashmed copper smelter. In: *Proc. of Int. Sc. and Tech. Conf. Belgorod, BSTU*. 2020. pp. 31-32. (In Russ.)
6. Merezhko A. I. Problems of small rivers and the main directions of their research. *Hydrobiological Journal*. 1998. Vol. 34. No. 6. pp. 66-71. (In Russ.)
7. Minkina T. M., Linnik V. G., Nevidomskaya D. G. Forms of heavy metal compounds in soils of the impact zone of the Karabashmed copper smelter. In: *Proceedings of the biogeochemical laboratory*. 2013. Vol. 26. pp. 294-300. (In Russ.) DOI: 10.13140/2.1.3533.3767.
8. Pashkevich M. A., Kharko P. A. The use of a composite mixture for the purification of acidic drainage waters of the tailings from metals. *Enrichment of Ores*. 2022. No. 4. pp. 40-47. (In Russ.)
9. Pashkevich M. A., Beck J., Matveeva V. A., Alekseenko A. V. Biogeochemical assessment of soils and plants in industrial, residential and recreational areas of Saint Petersburg. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 241. pp. 125. (In Russ.)
10. Reutova N. V., Reutova T. V., Dreeva F. R., Khutuev A. M. Microelements in the surface waters of the Malka River basin and geochemical features of the region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 172-184. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.20.60.014.
11. Sudarikov S. M., Jungmeister D. A., Korolev R. I., Petrov V. A. On the possibility of reducing man-made burden on benthic biotic communities when mining solid minerals using technical means of various designs. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 253. pp. 82-96. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2022.14.
12. Tkachev B. P., Bulatov V. I. Small rivers: current state and environmental problems. *Ecology. A series of analytical reviews of world literature*. 2002. No. 64. 114 p. (In Russ.)
13. Ulrikh D. V., Bryukhov M. N., Timofeeva S. S. Influence of enrichment plant waste on water bodies of the Chelyabinsk region. *Mining informational and analytical bulletin*. 2015. Vol. 4. p. 13. (In Russ.)
14. Abrosimova N., Bortnikova S. The Role of Anionogenic Elements (As, Sb, Mo, Se, S, P, N, Cl, F, C) in the Formation of Technogenic Geochemical Anomalies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 95. Issue 4. No. 042024. DOI: 10.1088/1755-1315/95/4/042024.

15. Bortnikova S. B., Bessonova E. P., Maximova N. V., Kolmogorov Yu. P., Ozherelyeva N. V., Bessonov D. Yu. Heavy metals in the region of deposited sulfide tailings: Distribution and ways of conservation (Karabash, South Ural). *Poverkhnost Rentgenovskie Sinkhronnye I Nejtronnnye Issledovaniya*. 2005. Vol. 9. pp. 25-29.
16. Kuznetsov V. S., Petrov D. S. Assessing the Environmental Condition of Minor Rivers in Urban Areas. *Journal of Ecological Engineering*. 2017. Vol. 18. pp. 110-114. DOI: 10.12911/22998993/76221.
17. Lytaeva T. A., Isakov A. E. Environmental impact of the stored dust-like zink and iron containing wastes. *Journal of Ecological Engineering*. 2017. Vol. 18. pp. 37-42.
18. Matveeva V. A., Chukaeva M. A., Sverchkov I. P. Low-cost sorption technologies for large-tonnage wastewater treatment in mining industries. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Conf. Ser. 1384. 012028. DOI:10.1088/1742-6596/1384/1/012028
19. Minkina T. M., Linnik V. G., Nevidomskaya D. G. et al. Forms of Cu (II), Zn (II), and Pb (II) compounds in technogenically transformed soils adjacent to the Karabashmed copper smelter. *Journal of Soils and Sediments*. 2018. Vol. 18. pp. 2229-2230. DOI: 10.1007/s11368-017-1777-2
20. Rumynin V. G., Nikulenkov A. M., Rozov K. B., Vladimirov K. V., Erzova V. A. The status and trends in radioactive contamination of groundwater at a LLW-ILW storage facility site near Sosnovy Bor (Leningrad region, Russia). *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021. Vol. 237. p. 106707. DOI: 10.1016/j.jenvrad. 2021.106707
21. Tatsy Y. G. Assessment of the Distribution of Heavy Metals around a Cu Smelter Town, Karabash, South Urals, Russia. *E3S Web of Conferences*. 2013. Vol. 1. No. 19010. DOI: 10.1051/e3sconf/20130119010
22. Yurkevich N. V., Saeva O. P., Karin Y. G. Geochemical anomalies in two sulfide-bearing waste disposal areas: Fe, Cu, Zn, Cd, Pb, and As in contaminated waters and snow, Kemerovo and Chelyabinsk regions, Russia. *Toxicological and Environmental Chemistry*. 2015. Vol. 97. pp. 76-89. DOI: 10.1080/02772248.2015.1041955

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК: 502.57+912.4

DOI: [10.46698/VNC.2022.39.75.014](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.39.75.014)

Оригинальная статья

Анализ состояния водоохранной зоны городского округа Дербент на основе ГИС-технологий

А. В. Скрипчинский , А. Д. Бадов , О. А. Бадов , Д. Д. Борисов 

Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355017, г. Ставрополь, ул.
Пушкина, д. 1, e-mail: ron1975@list.ru

Статья поступила: 22.09.2022, доработана: 20.10.2022, одобрена в печать: 25.10.2022

Резюме: Актуальность работы. Современное развитие приморских городов связано с реализацией их природно-климатического и зачастую историко-культурного потенциалов. Развитие Северо-Кавказского федерального округа предполагает реализацию пляжного туризма на побережье Каспийского моря. Разрешённое использование водоохраных и прибрежных защитных зон регламентируется ст. 65 Водного кодекса РФ. Несмотря на разработанные методические указания по осуществлению государственного мониторинга водных объектов и режима использования водоохраных зон в настоящее время информация о водоохраных зонах и прибрежных защитных полосах разобщена в разных информационных системах и различных форматах. Современные геоинформационные технологии, на базе которых возможен синтез пространственной информации (данные Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии и данные дистанционного зондирования Земли) позволяют создавать геоинформационные модели выявленных нарушений прибрежных защитных полос. **Целью исследования** является оценка состояния водоохранной зоны г. Дербента. **Методы исследования** базируются на использовании кадастровой информации и геоинформационных технологиях. На основе анализа 4525 земельных участков, с использованием QGIS, находящихся на территории водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы г. Дербента был выявлен ряд нарушений. Итогом работы явились картографические материалы по 34 кадастровым кварталам и итоговые карты, позволяющие оценить состояние исследуемых территорий. **Результаты исследования.** Наибольшее количество нарушений в водоохранной зоне выявлено в северной части г. Дербент. В прибрежной защитной полосе также отмечается максимум объектов нарушений с доминирующим типом разрешенного использования «Садоводство». В центральной части города отмечено максимальное разнообразие видов нарушений. Южная часть города характеризуется наименьшим количеством объектов нарушений. В границах водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы Каспийского моря городского округа г. Дербент выявлено 2005 объектов нарушений, из которых большая часть расположена в водоохранной зоне. Объекты нарушений выявлены на более чем 40% проанализированных земельных участков. Разработанные методические приемы могут быть масштабируемыми для создания картографических материалов выявленных нарушений условий использования водоохраных зон и прибрежных защитных полос, как отдельных территорий, так и субъектов РФ.

Ключевые слова: водоохранные зоны, прибрежные защитные полосы, кадастровые планы территории, ГИС, Дербент.

Для цитирования: Скрипчинский А. В., Бадов А. Д., Бадов О. А., Борисов Д. Д. Анализ состояния водоохранной зоны городского округа Дербент на основе ГИС-технологий. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (4): 180-192. DOI: [10.46698/VNC.2022.39.75.014](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.39.75.014).

DOI: [10.46698/VNC.2022.39.75.014](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.39.75.014)

Original paper

Waterprotection zone state analysis of the Derbent city district on the basis of GIS technologies

A. V. Skripchinsky^{ID}, A. D. Badov^{ID}, O. A. Badov^{ID}, D. D. Borisov^{ID}

North Caucasian Federal University, 1Pushkin str., Stavropol355017, Russian Federation,
e-mail: ron1975@list.ru

Received: 22.09.2022, revised: 20.10.2022, accepted: 25.10.2022

Abstract: Relevance. The modern development of coastal cities is associated with the realization of their natural-climatic and often historical-cultural potentials. The development of the North Caucasian Federal District involves the implementation of beach tourism on the coast of the Caspian Sea. The permitted use of water protection and coastal protection zones is regulated by Art. 65 of the Water Code of the Russian Federation. Despite the developed methodological guidelines for the implementation of water bodies state monitoring and orderliness of water protection zones use information on water protection zones and coastal protective strips is fragmented at present in different information systems and various formats. Modern geoinformation technologies, on the basis of which the synthesis of spatial information is possible (data from the Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography and Earth remote sensing data) allow creating geoinformation models of identified violations of coastal protective belts. **The aim of the study** is to assess the water protection zone state of the city of Derbent. **Research methods** are based on the use of cadastral information and geoinformation technologies. Based on the analysis of 4525 land plots located on the territory of the water protection zone and the coastal protective strip of the city of Derbent using QGIS, a number of violations were identified. The outcome of the study is cartographic materials for 34 cadastral quarters and final maps that allow assessing the state of the studied territories. **Results.** The largest number of violations in the water protection zone was found in the northern part of Derbent. There is also a maximum number of violations with the dominant type of permitted use "Gardening" in the coastal protective zone. The maximum diversity of violation types was noted in the central part of the city. The southern part of the city is characterized by the least number of violations. Within the boundaries of the water protection zone and the coastal protective strip of the Caspian Sea of the Derbent urban district 2005 objects of violations were identified, most of which are located in the water protection zone. Violations were identified on more than 40% of the analyzed land plots. The developed methodological techniques can be scalable for creating cartographic materials of identified violations of the conditions for the use of water protection zones and coastal protective strips, both for individual territories and subjects of the Russian Federation.

Keywords: water protection zones, coastal protection strips, cadastral plans of a territory, GIS, Derbent.

For citation: Skripchinsky A. V., Badov A. D., Badov O. A., Borisov D. D. Water protection zone state analysis of the Derbent city district on the basis of GIS technologies. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (4): 180-192. DOI: 10.46698/VNC.2022.39.75.014.

Введение

Проблематика сохранения водных ресурсов является актуальной задачей, значимость которой возрастает в связи с изменением климата [Nguyen et al., 2022; Lu et al., 2022; Tretiak et al., 2020]. Особенно это важно при разработке стратегий развития приморских городов, одним из которых является г. Дербент. Специфика природно-климатических условий, высокий потенциал историко-культурной значимости и геостратегическая роль обуславливают поиск новой модели развития го-

рода. Сохранение природной составляющей, является одной из основополагающих задач, которая впоследствии сможет обеспечить курортную привлекательность г. Дербента.

Стратегия социально-экономического развития Северо-Кавказского федерального округа до 2025 г. предполагает развитие пляжного туризма на побережье Каспийского моря. Также высоко оценивает потенциал Республики Дагестан Всемирная туристская организация, которая выделяет ее в числе наиболее перспективных туристических направлений юга России [Ахмедуев, Рабаданова, 2013]. Интенсивное развитие жилья в республике Дагестан, приводит к появлению самостроев и несоблюдению законодательства. Совокупность этих факторов и обусловила актуальность проводимого исследования и его практическую значимость. Важно отметить, что проблематика несоответствий ведения водного реестра и кадастровых данных наиболее актуальна для субъектов Северо-Кавказского федерального округа [Бабина и др., 2021]. Геоэкологические задачи эффективно решаются на основе геоинформационных технологий [Яицкая, Бригида, 2022].

Водный Кодекс Российской Федерации (далее ВК РФ), принятый в 2006 году регулирует всю деятельность, связанную с водными объектами. Согласно данным статьи 65 ВК РФ, водный объект – это не только источник воды, основа жизнедеятельности человека, важная составляющая окружающей среды, но и объект права собственности и иных прав.

Материалы и методы исследования

Как было указано выше, основным нормативным документом для оценки состояния водоохранных и прибрежных защитных зон является статья 65 ВК РФ, где указаны ограничения деятельности в пределах этих зон [Школьный, Завадский, 2021]. Методические указания по осуществлению государственного мониторинга водных объектов в части наблюдения за состоянием дна, берегов, изменениями морфометрических особенностей, состоянием и режимом использования водоохранных зон, водохозяйственных систем и гидротехнических сооружений регламентируют проведение мониторинга [Шабанов, Маркин, 2015]. В числе специфических задач выделяется проведение анализа экосистем водоохранных зон и соблюдение особых режимов антропогенной деятельности в водоохранных зонах. В большей степени методические рекомендации рассматривают вопросы деформации ложа водоемов, речных русел и пойм, а также затопливаемые участки. В методических рекомендациях указывается, что все топографические работы и материалы дистанционного зондирования поверхности Земли создаются на основе геоинформационных систем. В качестве материалов, направляемых органам исполнительной власти субъекта федерации, одним из итогов мониторинга выступает карта выявленных нарушений условий использования водоохранных зон. В разделе 5 Методических указаний указывается, что нормативная и методическая базы, необходимые для осуществления мониторинга по использованию водоохранных зон разработаны не полностью.

Зачастую проблематика мониторинга водоохранных зон и речных бассейнов рассматривается с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) и геоинформационных технологий, которые являются наиболее эффективным ресурсом [Rasuly et al., 2010; Быстров, 2018; Liu et al., 2018; Wu, 2018; Kourosh et al., 2020; Быстров, Майоров, 2021; Hawash et al., 2021; Лупян и др., 2022; Губа-

нов, 2022]. В ряде работ выделяются типы мониторинга вышеуказанных территорий такие как: мониторинг ведения хозяйственной деятельности и экологический мониторинг [Молодык и др., 2019; Вуглинский и др., 2021; Решетило, Хлебникова, 2021; Сазонов и др., 2022; Ewane, 2021; Riechers et al., 2021].

Информация из Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии РФ была получена в формате *.xml, которую впоследствии с использованием данных из сети Интернет и геоинформационных систем преобразовали в формат *.shp. Таким образом, были получены векторные контуры прибрежной защитной полосы водного объекта и его водоохранной зоны.

Созданные векторные слои характеризуются обширной базой данных, созданной Росреестром РФ, что позволило получить оригинальные контуры водоохранной зоны или прибрежной защитной полосы. Итогом работы явились данные в векторной форме, имеющие характерную атрибутивную составляющую и точные пространственные характеристики.

При обработке атрибутивной базы данных необходимо учитывать многие моменты, не прописанные в ст. 65 ВК РФ. Например, размещение гаражей не является нарушением расположения в границах водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы, однако, стоит рассмотреть данный объект с точки зрения нахождения машин, на данной территории, ведь стоянка и движение транспортных средств запрещены ст. 65 ВК РФ, так же, как и загрязнение территории загрязняющими веществами, такими как мазут, масло и другое. Также, в ст. 65 ВК РФ не запрещена постройка садового дома, малоэтажных квартир, индивидуальной жилой застройки, однако, если данные строения не имеют сооружений, препятствующих загрязнению, заилению и другим формам негативного воздействия на водные объекты, они учитываются. Таких объектов может быть множество, в связи с чем необходимо тщательно подходить к вопросу нарушений, ведь даже если их размещение в водоохранной зоне и прибрежной защитной полосе не запрещено, может быть запрещена какая-либо деятельность, связанная с ними.

Нами было проанализировано 4525 земельных участков, находящихся на территории водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы. Большую часть нарушений, согласно ст. 65 ВК РФ, в водоохранной зоне составляют территории, предназначенные для садоводства и огородничества, а также гаражные постройки. В прибрежной защитной полосе большая часть нарушений сосредоточена на таком типе застраиваемой территории, как садоводство и огородничество, а также территории, предназначенной для ведения личного подсобного хозяйства. Классифицировав атрибутивную базу данных, мы получили целостную картину нарушений, находящихся в водоохранной зоне и прибрежной защитной полосе.

В итоге были созданы карты по 34 кадастровым кварталам и итоговые карты, позволяющие оценить состояние водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы в границах городского округа Дербент.

Результаты работы и их обсуждение

Территория водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы вытянута с северо-запада на юго-восток и имеет протяженность 16 км. Официально городской округ (ГО) г. Дербент не районирован, исследование проводилось на основе вернукулярных районов города и кадастровых кварталов. Город не официально можно разделить на несколько районов.

К центральному району негласно относятся такие кадастровые кварталы (КК), как: 05:42:000047, 05:42:000046, 05:42:000003, 05:42:000049, 05:42:000007, 05:42:000015, 05:42:000052, 05:42:000062. На территории данного района располагаются административно-социальные объекты (Администрация ГО г. Дербент, школы, больницы, поликлиники, городской стадион и другое), многоквартирная (высотная) и индивидуальная жилая застройки. На территории данного района основными видами нарушений являются такие виды использования территории, как: «Для размещения гаража», относящиеся к нарушениям по причине возможного нахождения на их территории различных горючих, масел, и других отходов, которые могут негативно сказаться на состоянии водного объекта, а также, по данным объектам отсутствуют сооружения, предусмотренные ст. 65 ВК РФ; «Для размещения и обслуживания производственной базы», нахождение которой на территории водоохранной зоны не предусмотрено, так как не имеет сооружений (систем водоснабжения и водоотведения); «Садоводство» подразумевает распашку земель, которая запрещена ст. 65 ВК РФ на территории прибрежной защитной полосы, также у данного вида разрешенного использования, на территории КК отсутствуют сооружения, которые обязаны присутствовать, если территория размещена в водоохранной зоне и прибрежной защитной полосе; «Индивидуальная жилая застройка». В данном районе выявлено более 10 видов нарушений использования территории, что является максимальным показателем по всей исследуемой области.

В последние годы город активно растет в северном направлении, происходит комплексная застройка новых районов. Основными видами застройки являются индивидуальное одноэтажное и коттеджное строительство, а также многоэтажная (высотная) застройка. К новым территориально застраиваемым районам можно отнести следующие кадастровые кварталы: 05:42:000095, 05:42:000044, 05:42:000045, 05:42:000065, 05:42:000066, 05:42:000096, 05:42:000070. В связи с тем, что данная территория представлена частным жилым сектором, основными видами нарушений являются «Садоводство», которое подразумевает под собой распашку земель, запрещенную на территории прибрежной защитной полосы, а также земельные участки, выделенные под «Строительство садового дома», «Индивидуальная жилая застройка», «Дачное строительство», данные которых не содержат информацию о сооружениях (системах водоснабжения и водоотведения). На территории рассматриваемого района сосредоточено наибольшее количество объектов нарушений на территории водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы.

Южная часть города представлена туристско-рекреационными объектами (отели, гостиницы, кафе и рестораны, базы отдыха), а также административно-социальными объектами (вокзал, профильные учебные заведения, стационар). Территориально данный район можно отнести к следующим кадастровым кварталам: 05:42:000026, 05:42:000031, 05:42:000053, 05:42:000005, 05:42:000054, 05:42:000056, 05:42:000058, 05:42:000083. Основными видами нарушений на территории данного района являются земельные участки с видом разрешенного использования «Размещение и обслуживание трансформаторных подстанций (ТП)», «Для организации летнего кафе», «Для размещения кухни», в связи с отсутствием сооружений, требуемых ст. 65 ВК РФ; «Садоводство» и «Для ведения личного подсобного хозяйства», которые расположены не только на территории водоохранной зоны, но и прибрежной защитной полосы, где, согласно ст. 65 ВК РФ запрещена распашка земель, которую подразумевают данные виды земельных участков; производственную базу, находящуюся на территории водоохранной зоны и не имеющую сооружений (си-

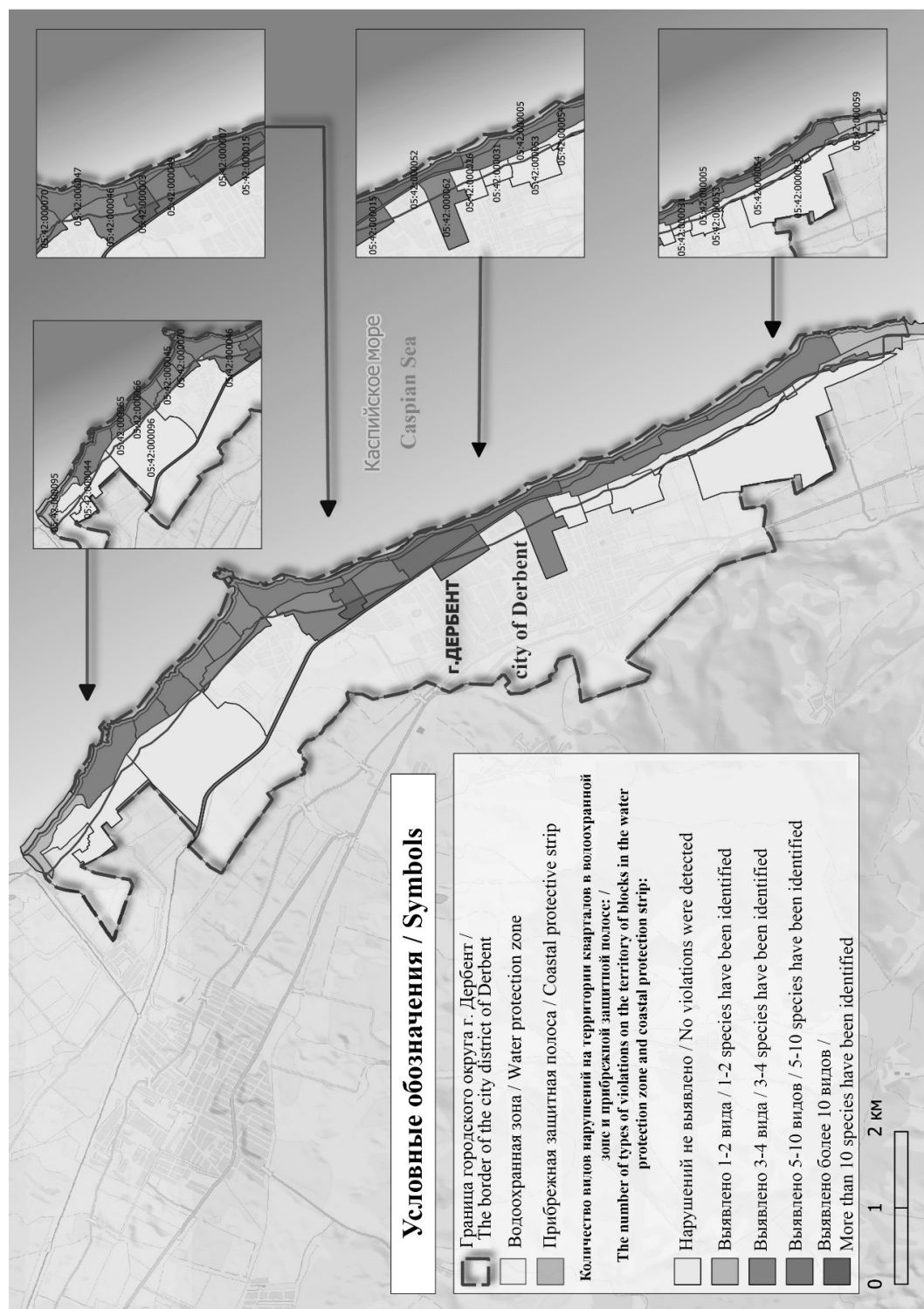


Рис. 1. Количество видов нарушений на территории кадастровых кварталов в водоохранной зоне и прибрежной защитной полосе / Fig. 1. The number of types of violations on the territory of cadastral blocks in the water protection zone and coastal protection strip

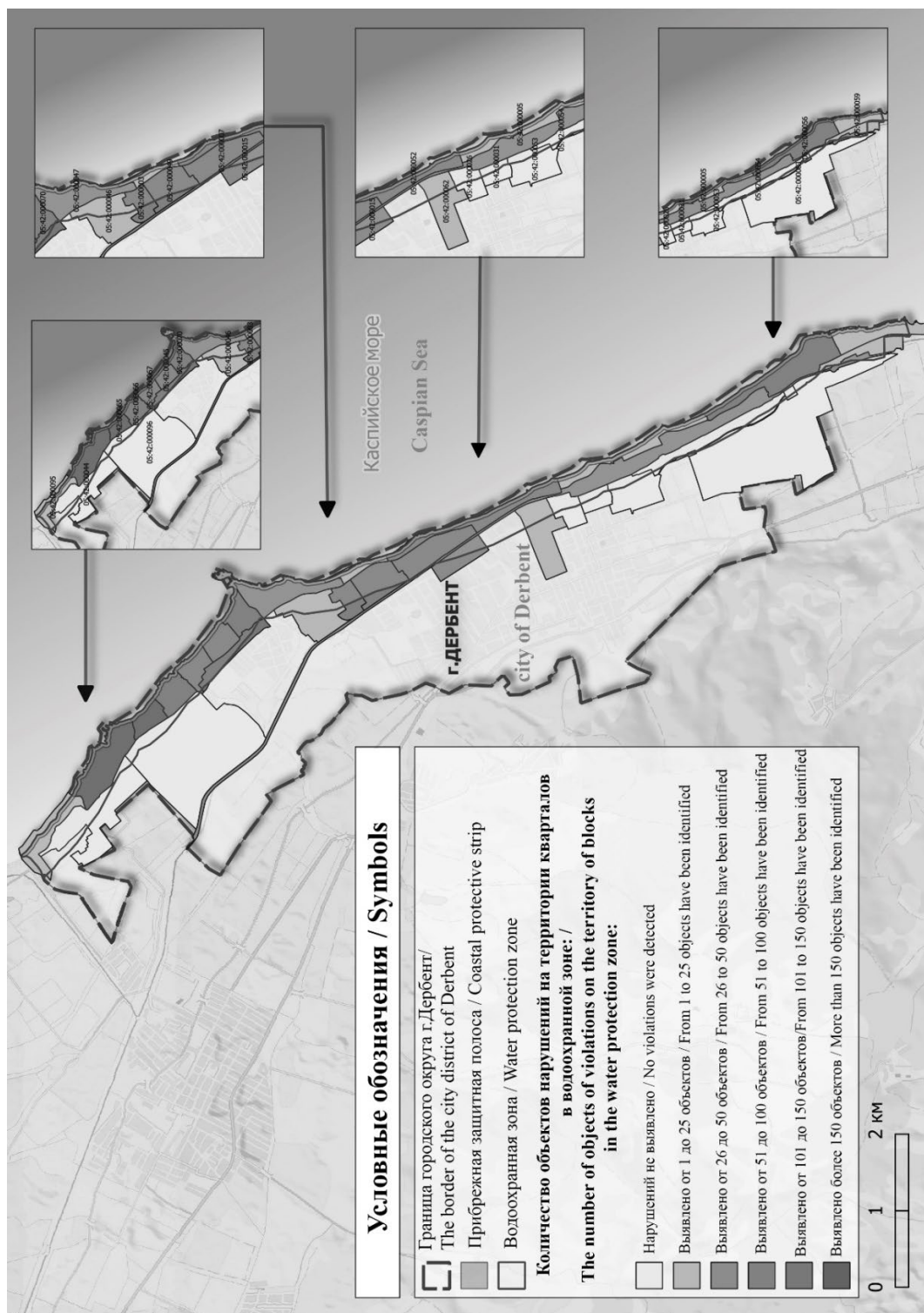


Рис. 2. Количество объектов нарушений на территории кварталов в водоохранной зоне /
Fig. 2. The number of objects of violations on the territory of blocks in the water protection zone

стемы водоотведения и другие системы, предотвращающие заиливание, загрязнение и другие формы негативного воздействия на объект) автоматически можно причислить к незаконному размещению на территории водоохранной зоны. На территории данного района выявлено наименьшее количество объектов нарушений.

В крайних северных и южных частях ГО г. Дербент (рис. 1) находятся КК, где, в основном, согласно ст. 65 ВК РФ, наблюдаются однотипные нарушения. На КК 05:42:000095 и 05:42:000059 наблюдается от 1 до 2 видов нарушений, основным видом нарушений на указанных КК является «Садоводство». Наибольшее количество видов нарушений находится в центральной части водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы на территории КК 05:42:000003, 05:42:000007, 05:42:000052, где выявлено более 10 видов нарушений использования территории. Это связано с тем, что постройки жителей находятся в центральной части ГО г. Дербент, и, желая оказаться как можно ближе к морю, начинают отстраиваться в интересующем их направлении, часто не учитывая многих ограничений, налагаемых на территорию водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы ВК РФ.

Большую площадь, по выявленным видам нарушений использования территории водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы занимают кварталы, где виды нарушений варьируются от 3-4 до 5-10.

В крайней северной части города, в КК 05:42:000095 (рис. 2) на территории водоохранной зоны находится наименьшее количество объектов, нарушающих ст. 65 ВК РФ. Наибольшее количество объектов нарушений водоохранной зоны находится в северной части ГО г. Дербент на территории КК 05:42:000064 и 05:42:000065, где выявлено более 150 объектов нарушений. Также, в северной части города располагается 5 КК, где количество объектов, нарушающих ст. 65 ВК РФ варьируется от 51 до 150. Вдоль побережья Каспийского моря, начиная с КК 05:42:000047 и до КК 05:42:000059, в основном, располагаются КК, где количество нарушений ст. 65 ВК РФ не превышает 50 объектов, однако, на КК 05:42:000003, 05:42:000049, 05:42:000007, КК 05:42:000052 выявлено от 51 до 100 объектов, а на территории КК 05:42:000056 находится от 101 до 150 объектов, нарушающих использование территории, согласно ст. 65 ВК РФ. Также, на территории водоохранной зоны в пределах ГО г. Дербент располагается 8 КК, где нарушений использования территории не выявлено.

На территории прибрежной защитной полосы и в пределах водоохранной зоны ГО г. Дербент наибольшее количество объектов, нарушающих использование территории, зафиксировано в северной части города, на территории КК 05:42:000064 (рис. 3). Здесь насчитывается более 50 объектов, не соответствующих требованиям ст. 65 ВК РФ по использованию территории. Большую часть нарушений составляет такой вид использования территории, как «Садоводство», нахождение которого на территории прибрежной защитной полосы недопустимо. Также много объектов, виды использования территории которых запрещены на территории прибрежной защитной полосы находятся в северной части ГО г. Дербент и занимают гораздо более обширную площадь, чем южная часть города. На окраине (КК 05:42:000095) и в центральной части города (КК 05:42:000090, 05:42:000005), в пределах прибрежной защитной полосы, находится наименьшее количество объектов, нарушающих ст. 65 ВК РФ.

Выводы

Уникальность ландшафтно-географического положения города Дербент придает ему рекреационно-туристическую привлекательность. Наличие природно-рекреационных и историко-культурных ресурсов территории обуславливают высокий

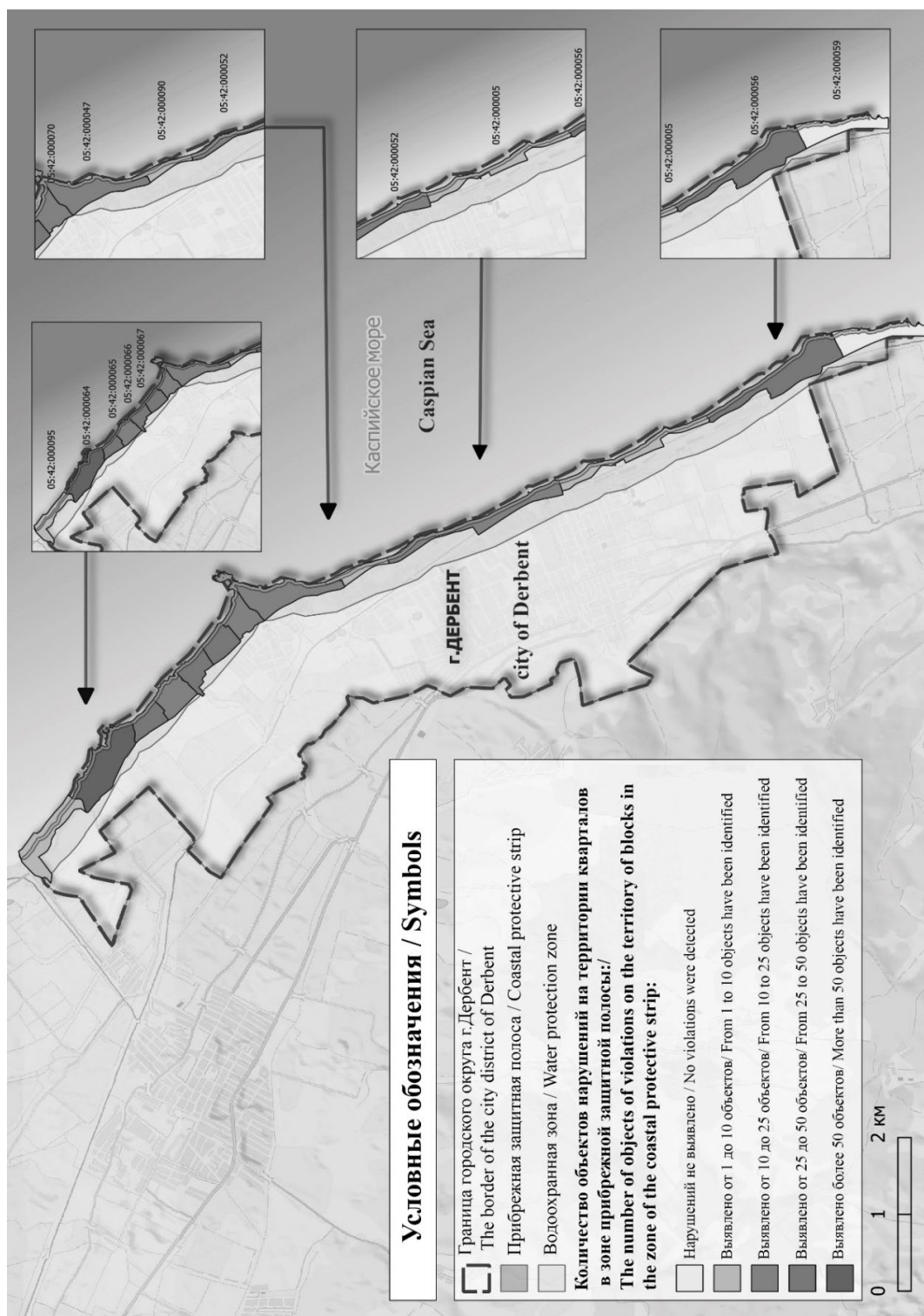


Рис. 3. Количество объектов нарушений на территории кварталов в зоне прибрежной защитной полосы /
Fig. 3. The number of objects of violations on the territory of blocks in the zone of the coastal protective strip

потенциал социально-экономического развития города. Водные объекты – наиболее востребованные ресурсы для промышленной и туристической деятельности, использование которых стимулирует развитие строительства вблизи береговой линии, а также водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы, объектов рекреационного, оздоровительного, индустриального, жилищно-коммунального и других типов. В связи с чем возникает необходимость в постоянном геоинформационном мониторинге данных территорий на предмет правонарушений.

В ходе исследования было проанализировано состояние водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы Каспийского моря в территориальной привязке к городскому округу город Дербент. Источниками информации для геоинформационного анализа являлись данные Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии, нормативные документы.

В ходе исследования была структурирована основная методика геоинформационного анализа водоохранных зон, которую можно представить в следующем виде:

1. Определение кадастровых кварталов, территориально затрагивающих водоохранную зону и прибрежную защитную полосу изучаемого водного объекта.
2. Получение информации о земельных участках, расположенных на территории исследуемых кварталов.
3. Преобразование базы данных земельных участков, работа с нормативно-правовыми документами.
4. Создание итоговых картографических произведений, отражающих уровень и виды нарушений в водоохранной зоне и прибрежной полосе исследуемого объекта.

Наибольшее количество объектов нарушений в водоохранной зоне выявлено в северной части города, максимум зарегистрирован на кадастровых кварталах 05:42:000064, 05:42:000065 и представлен в основном видом разрешенного использования «Садоводство». Также на данной территории города выявлен максимум объектов нарушений в прибрежной защитной полосе с чаще всего встречающимся видом нарушения «Садоводство». Максимум по количеству видов разрешенного использования наблюдается в центральной части города на кадастровых кварталах 05:42:000003, 05:42:000007, 05:42:000052. На каждом из указанных выше кварталов, количество видов разрешенного использования достигает более 10 видов. Южная часть характеризуется положительной тенденцией и имеет наименьшее количество объектов нарушений по всем показателям.

В пределах территории водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы Каспийского моря ГО г. Дербент было проанализировано 4525 земельных участков, расположенных на 34 кадастровых кварталах, выявлено 2005 объектов нарушений, из которых 1660 находятся на территории водоохранной зоны и 345 на территории прибрежной защитной полосы. Объекты нарушений выявлены на 44,3% проанализированных земельных участков.

Литература

1. Ахмедуев А. Ш., Рабаданова А. А. Стратегическое управление социально-экономическим развитием региона: монография. – М.: ЗАО «Издательство «Экономика», 2013. – 307 с.
2. Бабина Ю. В., Кочуров Б. И. Проблемы защиты поверхностных водных объектов в контексте земельных отношений на юге России. // Юг России: экология, развитие. – 2021. – Т. 16. №3 – С. 180-190. DOI:10.18470/1992-1098-2021-3-180-190

3. Быстров А. Ю. Разработка архитектуры геоинформационной системы мониторинга водоохранных зон рек и водохранилищ. // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2018. – Т. 62. № 1 – С. 114-119. DOI: 10.30533/0536-101X-2018-62-1-114-119
4. Быстров А. Ю., Майоров А. А. Обзор современных теорий и принципов построения мультифункциональных динамических мониторинговых геоинформационных систем. // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2021. – Т. 65. № 1. – С. 108-116. DOI: 10.30533/0536-101X-2020-65-1-108-116
5. Вуглинский В. С., Высоцкий Д. В., Яковлева Т. И. Мониторинг поверхностных водных объектов в России. // Метеорология и гидрология. – 2021. – № 6. – С. 77-88. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-6-77-88
6. Губанов Р. С. Оценка состояния водоохранных зон Центрального Предкавказья, на примере водных объектов Красногвардейского муниципального округа Ставропольского края при помощи методов дистанционного зондирования Земли. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12 (3). – С. 157-169. DOI: 10.46698/VNC.2022.95.62.011
7. Лупьян Е. А., Константинова А. М., Кашницкий А. В., Ермаков Д. М., Саворский В. П., Панова О. Ю., Брилл А. А. Возможные организации длительного дистанционного мониторинга крупных источников техногенного загрязнения для оценки их влияния на окружающую среду. // Современные проблемы дистанционного зондирования космоса. – 2022. – Т. 19. № 1. – С. 193-213. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-193-213
8. Молодык А. Д., Марин В. П., Маньшина И. В., Шошина Р. Р., Ваганов Г. А., Коржавый А. П. Концепция целевой региональной системы мониторинга поверхностных водных объектов. // Наукоемкие технологии. – 2019. – Т. 20. № 4. – С. 70-76. DOI: 10.18127/j19998465-201904-08
9. Решетило Н. С., Хлебникова Е. П. Возможность использования данных дистанционного зондирования при мониторинге водных объектов. // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – Т. 6. – С. 248-255. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-6-248-255
10. Сазонов А. Д., Закруткин В. Е., Решетняк О. С. Временная изменчивость поверхностного гидрохимического стока в бассейне реки Большой Егорлык в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12 (2). – С. 117-130. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.47.009
11. Шабанов В. В., Маркин В. Н. Ведение мониторинга водных объектов в современных условиях: монография. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2015-151с.
12. Школьный Д. И., Завадский А. С. Мониторинг берегов рек в рамках государственного мониторинга водных объектов: современное состояние и перспективы развития. // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2021. – № 2. – С. 22-39. – DOI 10.35567/1999-4508-2021-2-2.
13. Яицкая Н. А., Бригада 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
14. Ewane E. B. Land use land cover change and the resilience of social-ecological systems in a sub-region in South west Cameroon. // Environmental Monitoring and Assessment. – 2021. – Vol. 193. No. 338. DOI: 10.1007/s10661-021-09077-z
15. Hawash E., El-Hassanin A., Amer W., El-Nahry A., Effat H. Change detection and urban expansion of Port Sudan, Red Sea, using remote sensing and GIS. // Environmental Monitoring and Assessment. – 2021. – Vol. 193. No. 723. DOI: 10.1007/s10661-021-09486-0
16. KouroshNiya A., Huang J., Kazemzadeh-Zow A., Karimi H., Keshtkar H., Naimi B. Comparison of three hybrid models to simulate land use changes: a case study in Qeshm Island, Iran. // Environmental Monitoring and Assessment. – 2020. – Vol. 192. – p. 302. DOI: 10.1007/s10661-020-08274-6
17. Liu Y., Liu Y., Li J., Lu W., Wei X., Sun C. Evolution of Landscape Ecological Risk at the Optimal Scale: A Case Study of the Open Coastal Wetlands in Jiangsu, China. // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2018. – Vol. 15. No. 8. – p. 1691. DOI: 10.3390/ijerph15081691

18. Lu Y., Wang P., Wang C., Zhang M., Cao X., Chen C., Wang C., Xiu C., Du D., Cui H., Li X., Qin W., Zhang Y., Wang Y., Zhang A., Yu M., Mao R., Song S., Johnson A.C., Shao X., Zhou X., Wang T., Liang R., Su C., Zheng X., Zhang S., Lu X., Chen Y., Zhang Y., Li Q., Ono K., Stenseth N.C., Visbeck M., Ittekkot V. Multiple pollutants stress the coastal ecosystem with climate and anthropogenic drivers. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2022. Vol. 424. Part C. – p. 127570. DOI: 10.1016/j.jhazmat. 2021.127570
19. Nguyen N. T. H., Friess D. A., Todd P. A., Mazar T., Lovelock C. E., Lowe R., Gilmour J., Chou L. M., Bhatia N., Jaafar Z., Tun K., Yaakub S. M., Huang, D. Maximising resilience to sea-level rise in urban coastal ecosystems through systematic conservation planning. // *Landscape and Urban Planning*. – 2022. – Vol. 221. – p. 104374. DOI: 10.1016/j.landurbplan. 2022.104374
20. Rasuly A., Naghdifar R., Rasoli M. Monitoring of Caspian Sea Coastline Changes Using Object Oriented Techniques. // *Procedia Environmental Sciences*. – 2010. – Vol. 2. – pp. 416-426. DOI: 10.1016/j.proenv. 2010.10.046
21. Riechers M., Brunner B. P., Dajka J-C, Duşe I. A., Lübker H. M., Manlosa A. O., Sala J. E., Schaal T., Weidlich S. Leverage points for addressing marine and coastal pollution: A review. // *Marine Pollution Bulletin*. – 2021. – Vol. 167. – p. 112263. DOI: 10.1016/j.marpolbul. 2021.112263
22. Tretiak V., Tretiak N., Kravchuk T. Formation of urban land use within water conservation zones, protected shoreline belts and shorelines in the city. // *Land management, cadastre and land monitoring*. – 2020. – Vol. 1 (26). – pp. 96-107. DOI: 10.31548/zemleustriy2020.01.10
23. Wu Q. GIS and Remote Sensing Applications in Wetland Mapping and Monitoring // *Comprehensive Geographic Information Systems*. – Oxford: Elsevier. – 2018. – Vol. 2. – p. 140-157. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10460-9.

References

1. Akhmeduev A. Sh., Rabadanova A. A. Strategic management of the socio-economic development of the region. Monograph. Moscow. Economics. 2013. 307 p. (In Russ.)
2. Babina Yu. V., Kochurov B. I. Problems of protection of surface water bodies in the context of land relations in the south of Russia. *South of Russia, ecology, development*. 2021. Vol. 16. No. 3 pp. 180-190. DOI: 10.18470/1992-1098-2021-3-180-190 (In Russ.)
3. Bystrov A. Yu. Development of the architecture of a geographic information system for monitoring the water protection zones of rivers and reservoirs. *Geodesy and aerial photography*. 2018. Vol. 62. No. 1 pp. 114-119. DOI: 10.30533/0536-101X-2018-62-1-114-119 (In Russ.)
4. Bystrov A. Yu., Mayorov A. A. Review of modern theories and principles of building multifunctional dynamic monitoring geoinformation systems. *Geodesy and aerial photography*. 2021. Vol. 65. No. 1. pp. 108-116. DOI: 10.30533/0536-101X-2020-65-1-108-116 (In Russ.)
5. Vuglinskii V. S., Vysotskii D. V., Yakovleva T. I. Monitoring of surface water bodies in Russia. *Meteorology and hydrology*. 2021. No. 6. pp. 77-88. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-6-77-88 (In Russ.)
6. 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.)
7. Loupian E. A., Konstantinova A. M., Kashnitskii A. V., Ermakov D. M., Savorskiy V. P., Panova O. Yu., Bril A. A. The possibilities of organizing long-term remote monitoring of large sources of anthropogenic pollution to assess their impact on the environment. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2022. Vol. 19. No. 1. pp. 193-213. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-193-213 (in Russ.)
8. Molodyk A. D., Marin V. P., Manshina I. V., Shoshina R. R., Vaganov G. A., Korzhaviy A. P. Concept of a targeted regional system for monitoring surface water bodies. *Science-intensive technologies*. 2019. Vol. 20. No. 4. pp. 70-76. DOI: 10.18127/j19998465-201904-08 (in Russ.)

9. Reshetilo N.S., Khlebnikova E.P. The possibility of using remote sensing data in monitoring water bodies. *Interexpo Geo-Siberia*. 2021. Vol. 6. pp. 248-255. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-6-248-255 (in Russ.)
10. 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 (1). pp. 117-130. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.47.009. (in Russ.)
11. Shabanov V.V., Markin V.N. Conducting monitoring of water bodies in modern conditions. Monograph. Moscow. RSAU – MTAA. 2015 151 p. (in Russ.)
12. Shkolny D.I., Zavadsky A.S. Monitoring of river banks within the framework of state monitoring of water bodies: current state and development prospects. *Water industry in Russia: problems, technologies, management*. 2021. No. 2. pp. 22-39. DOI 10.35567/1999-4508-2021-2-2. (in Russ.)
13. Yaitskaya N.A., Brigida V.S. Geoinformation technologies in solving three-dimensional geoeological problems. Spatial data interpolation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12 (1). pp. 162-173. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012. (in Russ.)
14. Ewane E.B. Land use land cover change and the resilience of social-ecological systems in a sub-region in South west Cameroon. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2021. Vol. 193. No. 338. DOI: 10.1007/s10661-021-09077-z
15. Hawash E., El-Hassanin A., Amer W., El-Nahry A., Effat H. Change detection and urban expansion of Port Sudan, Red Sea, using remote sensing and GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2021. Vol. 193. No. 723. DOI: 10.1007/s10661-021-09486-0
16. Kourosh Niya A., Huang J., Kazemzadeh-Zow A., Karimi H., Keshtkar H., Naimi B. Comparison of three hybrid models to simulate land use changes: a case study in Qeshm Island, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020. Vol. 192. pp. 302. DOI: 10.1007/s10661-020-08274-6
17. Liu Y., Liu Y., Li J., Lu W., Wei X., Sun C. Evolution of Landscape Ecological Risk at the Optimal Scale: A Case Study of the Open Coastal Wetlands in Jiangsu, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018. Vol. 15. No. 8. pp. 1691. DOI: 10.3390/ijerph15081691
18. Lu Y., Wang P., Wang C., Zhang M., Cao X., Chen C., Wang C., Xiu C., Du D., Cui H., Li X., Qin W., Zhang Y., Wang Y., Zhang A., Yu M., Mao R., Song S., Johnson A.C., Shao X., Zhou X., Wang T., Liang R., Su C., Zheng X., Zhang S., Lu X., Chen Y., Zhang Y., Li Q., Ono K., Stenseth N.C., Visbeck M., Ittekkot V. Multiple pollutants stress the coastal ecosystem with climate and anthropogenic drivers. *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 424. Part C. pp. 127570. DOI: 10.1016/j.jhazmat. 2021.127570
19. Nguyen N.T.H., Friess D.A., Todd P.A., Mazor T., Lovelock C.E., Lowe R., Gilmour J., Chou L.M., Bhatia N., Jaafar Z., Tun K., Yaakub S.M., Huang, D. Maximising resilience to sea-level rise in urban coastal ecosystems through systematic conservation planning. *Landscape and Urban Planning*. 2022. Vol. 221. p. 104374. DOI: 10.1016/j. landurbplan. 2022.104374
20. Rasuly A., Naghdifar R., Rasoli M. Monitoring of Caspian Sea Coastline Changes Using ObjectOriented Techniques. *Procedia Environmental Sciences*. 2010. Vol. 2. pp. 416-426. DOI:10.1016/j. proenv. 2010.10.046
21. Riechers M., Brunner B.P., Dajka J.-C., Duş I.A., Lübker H.M., Manlosa A.O., Sala J.E., Schaal T., Weidlich S. Leverage points for addressing marine and coastal pollution: A review. *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 167. p. 112263. DOI: 10.1016/j. marpolbul. 2021.112263
22. Tretiak V., Tretiak N., Kravchuk T. Formation of urban land use within water conservation zones, protected shoreline belts and shorelines in the city. *Land management, cadastre and land monitoring*. 2020. Vol. 1. pp. 96-107. DOI: 10.31548/zemleustriy2020.01.10
23. Wu Q. GIS and Remote Sensing Applications in Wetland Mapping and Monitoring. *Comprehensive Geographic Information Systems*. Oxford, Elsevier. 2018. Vol. 2. pp. 140-157. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10460-9.

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: 1.6.9. Геофизика (физико-математические науки, технические науки, геолого-минералогические науки); 1.6.10. Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения (технические науки, геолого-минералогические науки); 1.6.12. Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов (географические науки); 1.6.21. Геоэкология (географические науки, геологоминералогические науки, технические науки); 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика (технические науки), 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 $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, $\cos$, $\sin$, $\min$, $\max$ и т. п. набираются прямым шрифтом. Символ не должен сливаться с надсимвольным

элементом в химических элементах (H_2O) и единицах измерений ($МВт/см^2$) – прямым (обычным) шрифтом. Не следует смешивать одинаковые по написанию буквы латинского, греческого и русского алфавитов, использовать собственные макросы. Буквы I и J, v и u, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (нуль) должны различаться по начертанию. Между цифровым значением величины и ее размерностью следует ставить знак неразрывного пробела. Переносы в словах либо не употреблять. Не использовать в тексте для форматирования знаки пробела. Формулы создаются с помощью встроенного редактора формул Microsoft Equation с нумерацией в круглых скобках – (2), выравниваются по правому краю, расшифровка всех обозначений (букв) в формулах дается в порядке упоминания в формуле. Во избежание недоразумений и ошибок редакция рекомендует авторам использовать в формулах буквы латинского, греческого и других (не русских) алфавитов; при наборе формул необходимо 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: 1.6.9. Geophysics (physical and mathematical sciences, technical sciences, geological and mineralogical sciences); 1.6.10. Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny (technical sciences, geological and mineralogical sciences); 1.6.12. Physical geography and biogeography, soil geography and landscape geochemistry (geographical sciences); 1.6.21. Geoecology (geographical sciences, geological and mineralogical sciences, technical sciences); 2.8.6. Geomechanics, destruction of rocks, mine aerogas dynamics and mining thermal physics (technical sciences), 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 $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, $\cos$, $\sin$, $\min$, $\max$, etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements (H_2O) and measurement units (MW/cm^2) and must be of the straight (ordinary) type. One shouldn't mix similar written letters of the Latin, Greek and Russian alphabets and should use the proper macros. The letters I and J, v and u, 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
(№ 4. 2022 г. Том 12)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 28.12.2022 г. Формат 60×84 1/8.

Дата фактического выхода 10.01.2023 г.

Усл. печ. лист 23,1. Гарнитура «Times».

Бумага офсетная. Печать цифровая. Тираж 100 экз. Заказ № 149.

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