

ISSN 2221-3198

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 2 / 2025



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 15
№ 2 / 2025**

Владикавказ 2025

**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**, Кубанский государственный университет, г. Краснодар

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

академик РАН **М. Ч. Залиханов**, Высогогорный геофизический институт, г. Нальчик
член-корр. НАНА **Г. Д. Етирмишли**,

Республиканский Центр сейсмологической службы при НАНА, Азербайджан

академик АНГ **Т. Л. Челидзе**, Тбилисский государственный университет им. И. Джавахишвили, Грузия

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

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

член-корр. РАН **А. Л. Собисевич**, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

д.г.-м.н., проф. **В. В. Стогний**, Кубанский государственный университет, г. Краснодар

д.ф.-м.н., проф. **Ю. К. Чернов**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

д.г.-м.н. **В. И. Черкашин**, Институт Геологии ДФИЦ РАН, г. Махачкала

д.г.н. **В. А. Широкова**, 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**, Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

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

Журнал включен в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus

Журнал издается с 2011 года.

Периодичность издания – 4 номера в год

Учредитель:

ВНЦ РАН

Адрес учредителя:

363110, РСО-Алания, Пригородный район,
с. Михайловское, ул. Вильямса, 1

Тел.: 8(8672)726788

e-mail: info@vncran.ru

http://vncran.ru

Издатель:

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук

Адрес издателя и редакции:

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

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

e-mail: southgeo@mail.ru

http://geosouth.ru

ISSN 2221-3198

e-ISSN 2686-7486

Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 29119

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

© Геофизический институт ВНЦ РАН, 2025

Фото на обложке – Владикавказ (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
Centre 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, Kuban
State University, Krasnodar, Russian Federation
Alexey D. Gvishiani, Academician of RAS, Geophysical
Centre of RAS, Moscow, Russian Federation
Mikhail Ch. Zalikhanov, Academician of RAS, High
Mountain Geophysical Institute, Nalchik,
Russian Federation
Gurban J. Yetirmishli, Academician of Azerbaijan
National Academy of Sciences (ANAS), Republican
Seismic Survey Centre of ANAS, Azerbaijan
Tamaz L. Chelidze, Academician of Georgian National
Academy of Sciences (GNAS), Geophysics of Ivane
Javakishvili Tbilisi State University, Georgia
Sevada M. Hovhannisyan, Academician of National
Academy of Sciences of the Republic of Armenia
(NAS RA), Nazarov Institute of Geophysics and
Engineering Seismology of NAS RA, Armenia
David R. Kaplunov, Corresponding Member of RAS,
Institute of Complex Exploitation of Mineral
Resources of RAS, Moscow, Russian Federation
Alexey L. Sobisevich, Corresponding Member of
RAS, Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS,
Moscow, Russian Federation
Anatoly A. Soloviev, Corresponding Member of RAS,
Geophysical Centre of RAS, Moscow, Russian
Federation
Peter N. Shebalin, Corresponding Member of RAS,
Institute of Earthquake Prediction Theory and
Mathematical Geophysics of RAS, Moscow,
Russian Federation
Igor A. Beresnev, Ph.D., Iowa State University, USA
Kuo-Liang Wen, Ph.D., Prof., National Central
University, Taiwan

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

Taxiarchis Papadopoulos, Ph.D., Prof., National and
Kapodistrian University of Athens, Greece

Ali Pinar, Ph.D., Prof., Bosphorus University, Turkey

Vladimir I. Golik, Dr. Sci. (Tech.), Prof., Geophysical
Institute of Vladikavkaz Scientific Centre of RAS,
Vladikavkaz, Russian Federation

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

Vladimir M. Makeev, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Sergeev
Institute of Environmental Geoscience of RAS, Moscow,
Russian Federation

Illarion D. Muzaev, Dr. Sci. (Tech.), Prof., Geophysical
Institute of Vladikavkaz Scientific Centre of RAS,
Vladikavkaz, Russian Federation

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

Marina V. Rylnikova, Dr. Sci. (Tech.), Prof., Institute
of Complex Exploitation of Mineral Resources of RAS,
Moscow, Russian Federation

Valeriy V. Stogny, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof., Kuban
State University, Krasnodar, Russian Federation

Yuriy K. Chernov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,
Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Centre
of RAS, Vladikavkaz, Russian Federation

Vasiliy I. Cherkashin, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Institute
of Geology of Dagestan Federal Research Centre of
RAS, Makhachkala, Russian Federation

Vera A. Shirokova, Dr. Sci. (Geog.), 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 Centre of RAS,
Vladikavkaz, Russian Federation

Managing Editor

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

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

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

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

Founder:

Vladikavkaz Scientific Centre of RAS

Founder address
1 Williamsa Str., Mikhailovskoe,
Prigorodny district,
RNO-Alania, 363110, Russia
Tel.: 8(8672)726788
e-mail: info@vncran.ru
http://vncran.ru

Publisher:

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

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

**ISSN 2221-3198
e-ISSN 2686-7486**

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

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

© Geophysical Institute VSC RAS, 2025

Cover photo – Vladikavkaz (K.S. Kharebov)

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ	
Газеев В.М., Кондрашов И.А.	
Граносиениты чучкурского гипабиссального комплекса (Передовой хребет Большого Кавказа): вопросы петрогенезиса, геодинамическая типизация.....	8
ГИДРОГЕОЛОГИЯ	
Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И.	
Математическое моделирование одного эффективного способа забора воды из определенного слоя двухслойного стратифицированного водоема	21
ГЕОТЕКТНИКА И ГЕОДИНАМИКА	
Мясников А.В., Стогний В.В.	
Короткопериодные компоненты движения полюсов Земли и современная геодинамика	33
Попков В.И., Попков И.В.	
Послойные тектонические срывы в осадочном чехле платформ и некоторые практические следствия	50
ГЕОФИЗИКА	
Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Евдокимов В.С.	
О зоне пониженной сейсмической опасности при переходе горной территории в равнинную	63
Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я., Калинин И.В.	
Инверсионный характер кинематических обстановок сейсмогенеза Среднекаспийского региона.....	73
Горбатиков А.В., Заалишвили В.Б., Харазова Ю.В., Степанова М.Ю., Кошевой Н.Г., Андреева Н.В., Цуканов А.А., Шманатов Г.В., Мерзликин Т.И.	
Исследование глубинного строения и тектоники северного склона Большого Кавказа и западной части Терско-Каспийского прогиба по результатам микросейсмического зондирования	87
Дударов З.И., Белобородов Д.Е.	
Проявление в низкочастотном поле микросейсм глубинных неоднородностей грязевого вулкана Джау-Тепе	103
Телятников И.С., Павлова А.В.	
К задачам теории «вирусов» вибропрочности в сейсмологии.....	116
Nath A., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P.	
Social vulnerability and spatial adaptation: A case study of community responses to natural disasters in Silchar, Assam State, India	128
Yetirmishli G.J., Kazimova S.E., Samedzade A.V.	
Integrated application of geophysical methods in the South Caspian basin (based on the Bulla-Deniz oil and gas field)	142
ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ	
Артемов И.А.	
Минералого-петрографическая зональность горелых горных отвалов угольных шахт (Восточный Донбасс).....	155
Парада С.Г.	
Геохимические особенности вмещающих пород золоторудных проявлений Восточного Донбасса	166

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р.

Сохранение фильтрационно-ёмкостных свойств продуктивных пластов при их временной изоляции 180

Рыбин И.В.

Ресурсы метана в подработанном массиве – как опасное может стать полезным 196

Черненко К.И., Саидова К.М., Еремина Н.В., Шатохин Н.Е.

Выделение зон повышенной трещиноватости нефтекумского природного резервуара

Восточно-Безводненского месторождения с использованием программного продукта «тНавигатор» 206

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р.

Природное и антропогенное загрязнение микроэлементами верховий бассейна р. Ардон 219

Тимченко В.Ю., Каменецкий Е.С., Радионов А.А.

Пространственно-временные вариации трендов индекса NDVI в горных и предгорных районах

Северного Кавказа..... 231

Федотова А.В., Тимофеев Е.П.

Валовое содержание тяжелых металлов и мышьяка в почвах защитных лесных насаждений

сухостепной зоны Волгоградской области..... 244

ЮБИЛЕИ

Сергей Григорьевич Парада..... 255

Анатолий Иванович Гавришин 258

CONTENTS

===== GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY =====	
Gazeev V.M., Kondrashov I.A.	
Granosyenites of the Chuchkur hypabyssal complex (Greater Caucasus Front Range): petrogenesis issues, geodynamic typing.....	8
===== HYDROGEOLOGY =====	
Muzaev I.D., Kharebov K.S., Muzaev N.I.	
Mathematical modeling of one effective method of water intake from a certain layer of a two-layered stratified reservoir	21
===== GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS =====	
Myasnikov A.V., Stogny V.V.	
Short-period components of the Earth's polar motion and modern geodynamics	33
Popkov V.I., Popkov I.V.	
Layered tectonic disruptions in the sedimentary cover of platforms and some practical consequences.....	50
===== GEOPHYSICS =====	
Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Evdokimov V.S.	
About the zone of reduced seismic hazard in the transition from mountainous to flat terrain	63
Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya., Kalinyuk I.V.	
Inversion character of kinematic conditions of seismogenesis in the Middle Caspian region.....	73
Gorbatikov A.V., Zaalishvili V.B., Kharazova Yu.V., Stepanova M.Yu., Koshevoy N.G., Andreeva N.V., Tsukanov A.A., Shmanatov G.V., Merzlikin T.I.	
Study of the deep structure and tectonics of the northern slope of the Greater Caucasus and the western part of the Terek-Caspian depression based on the results of microseismic sounding.....	87
Dudarov Z.I., Beloborodov D.E.	
Identification of deep inhomogeneities of the Dzhau-Tepe mud volcano in the low-frequency field of microseisms.....	103
Telyatnikov I.S., Pavlova A.V.	
On the problems of the theory of vibration-strength "viruses" in seismology.....	116
Nath A., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P.	
Social vulnerability and spatial adaptation: A case study of community responses to natural disasters in Silchar, Assam State, India.....	128
Yetirmishli G.J., Kazimova S.E., Samedzade A.V.	
Integrated application of geophysical methods in the South Caspian basin (based on the Bulla-Deniz oil and gas field)	142
===== GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY =====	
Artemov I.A.	
Mineralogical and petrographic zoning of rocks of burning waste heaps of the Eastern Donbass.....	155
Parada S.G.	
Geochemical features of the host rocks of the gold ore occurrences of the Eastern Donbass	166

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF OIL AND GAS FIELDS

Gasumov R.A., Gasumov E.R.

Preservation of filtration and capacity properties of productive formations during their temporary isolation180

Rybin I.V.

Methane resources in the undermined strata: from hazard to valuable resource196

Chernenko K.I., Saidova K.M., Yeriomina N.V., Shatokhin N.E.

Identification of increased fracturing zones of the Nefttekumsk natural reservoir on the Vostochno-Bezvodnenskoye field using the software product "tNavigator"206

GEOECOLOGY

Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R.

Natural and anthropogenic microelement pollution of the upper reaches of the Ardon River basin219

Timchenko V.Yu., Kamenetsky E.S., Radionoff A.A.

Spatiotemporal variations of NDVI index trends in mountainous and foothill areas of the North Caucasus231

Fedotova A.V., Timofeev E.P.

Total content of heavy metals and arsenic in soils of protective forest plantations in the dry-steppe zone of Volgograd region244

JUBILEES

Sergey Grigorievich Parada255

Anatoly Ivanovich Gavrishin258

УДК 552.323.5

DOI: 10.46698/VNC.2025.39.34.002

Оригинальная статья

Граносиениты чучкурского гипабиссального комплекса (Передовой хребет Большого Кавказа): вопросы петрогенезиса, геодинамическая ТИПИЗАЦИЯ

В.М. Газеев^{1,2}, И.А. Кондрашов¹

¹ Институт геологии рудных месторождений петрографии, минералогии и геохимии РАН, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35, e-mail: vik.gaz.54@mail.ru;

² Владикавказский научный центр РАН, Россия, 363110, с. Михайловское, ул. Вильямса, 1

Статья поступила: 10.03.2025, доработана: 27.05.2025, принята к публикации: 30.05.2025

Резюме: Актуальность работы. Изучение гранитоидов Большого Кавказа сформировавшихся на рубеже позднего палеозоя и мезозоя является важной проблемой в связи с тем, что с ними в регионе ассоциируют золото – полисульфидно – кварцевые рудные объекты. Также оно необходимо для уточнения особенностей магматизма и геодинамического развития региона в пермо-триасе. **Целью исследования** является получение аналитических данных, уточнение геодинамической позиции и рудной специализации гипабиссальных граносиенитов. **Объектами исследований** являлись массивы граносиенитов чучкурского комплекса распространенные в восточной части зоны Передового хребта Большого Кавказа. **Методы исследования** включали: изучение состава отобранных образцов *XRF*, *ISP-MS* методами, их петрографическое описание, расчеты геохимических характеристик, анализ дискриминационных диаграмм. **Результаты исследования.** Установлено, что граносиениты являются умеренно щелочными, высокомагнезиальными, умеренно калиевыми образованиями с калиево-натриевым типом щелочности. Показано, что они относятся к группе высоко *Ba-Sr* гранитоидов санукитоидного типа с повышенными концентрациями *Cr*, *Ni*, *Nd*, *LiLe*, *LREE*, и отношениями *Mg[#]*, *La/Yb*. Предполагается, что их исходные расплавы формировались в литосферной мантии на глубине 52-56 км при плавлении метасоматизированных перидотитов и возможном участии эклогитов деламинированной нижней коры. Отмечено, что с изученными породами ассоциируют сульфидные зоны не колчеданного типа, для которых характерны повышенные концентрации *Au*.

Ключевые слова: Большой Кавказ, петрография, геодинамика, санукитоиды, геохимия.

Благодарности: Работа выполнена в рамках Базовой темы Лаборатории Петрографии ИГЕМ РАН «Петрология магматических комплексов для реконструкции геодинамических режимов формирования Восточно-Европейского кратона» (рег. № FMMN-2024-0014.124022400143-9) и благодаря финансовой поддержке НИОКР КНИО ВНЦ РАН (рег. № 125022803010-6).

Для цитирования: Газеев В.М., Кондрашов И.А. Граносиениты чучкурского гипабиссального комплекса (Передовой хребет Большого Кавказа): вопросы петрогенезиса, геодинамическая типизация. // Геология и геофизика Юга России. 2025. 15(2): 8-20. DOI: 10.46698/VNC.2025.39.34.002

DOI: 10.46698/VNC.2025.39.34.002

Original paper

Granosyenites of the Chuchkur hypabyssal complex (Greater Caucasus Front Range): petrogenesis issues, geodynamic typing

V.M. Gazeev^{1,2}, I.A. Kondrashov¹

¹ Institute of Geology of Ore Deposits of Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, 35 Staromonetny lane, Moscow 119017, Russian Federation, e-mail: vik.gaz.54@mail.ru;

² Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 1 Williams Str., Mikhailovskoye village 363110, Russian Federation

Received: 10.03.2025, revised: 27.05.2025, accepted: 30.05.2025

Abstract: Relevance. The study of granitoids of the Greater Caucasus, formed at the turn of the Late Paleozoic and Mesozoic, is an important problem due to the fact that gold-polysulfide-quartz ore objects are associated with them in the region. It is also necessary to clarify the features of magmatism and geodynamic development of the region in the Perm-Trias. **The aim** of the study is to obtain analytical data, clarify the geodynamic position and ore specialization of hypabyssal granosyenites. **The objects** of study were massifs of granosyenites Chuchkur complex, distributed in the eastern part of the zone of the Front Range of the Greater Caucasus. **The research methods** included: study of the composition of selected samples by XRF, ICP-MS methods, their petrographic description, calculations of geochemical characteristics, analysis of discriminative diagrams. **Results.** It is established that granosyenites are moderately alkaline, high-magnesian, moderately potassic formations with potassium-sodium type of alkalinity. It is shown that they belong to the group of high Ba-Sr granitoids of sanukitoid type with increased concentrations of Cr, Ni, Nd, LiLe, LREE and Mg[#], La/Yb ratios. It is assumed that their initial melts were formed in the lithospheric mantle at a depth of 52-56 km during melting of metasomatized peridotites and possible participation of eclogites of the delaminated crust. It was noted that the studied rocks are associated with sulfide zones of non-kolchodan type, which are characterized by elevated Au concentrations.

Keywords: Greater Caucasus, petrography, geodynamics, sanukitoids, geochemistry.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the Basic Theme of the IGEM RAS Laboratory of Petrography, "Petrology of Magmatic Complexes for Reconstruction of Geodynamic Regimes of the East European Craton Formation" (No. FMMN-2024-0014.124022400143-9), and with financial support from the NIOKTR KNIO VSC RAS (No. 125022803010-6).

For citation: Gazeev V.M., Kondrashov I.A. Granosyenites of the Chuchkur hypabyssal complex (Greater Caucasus Front Range): petrogenesis issues, geodynamic typing. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 8-20. DOI: 10.46698/VNC.2025.39.34.002

Введение

Петролого – геохимическое изучение гранитоидов Передового хребта (ПХ) Большого Кавказа (БК) сформировавшихся на рубеже позднего палеозоя и мезозоя является важной задачей. Ее актуальность определяется тем, что с ними пространственно ассоциируют мелкие золото – полисульфидно-кварцевые месторождения и рудопоявления. **Целью исследования** является изучение монцонитов и

граносиенитов чучкурского гипабиссального комплекса (ЧК), уточнение условий их формирования, определение геодинамической принадлежности, петрогеохимического типа. **Объектами для исследования** выбраны гипабиссальные монцониты и граносиениты ЧК распространенные в восточной части ПХ БК, где они образуют субширотный прерывистый пояс протяженностью 60 км, в междуречье Баксан – Малка – Кубань – Теберда. Интрузивы ЧК (рис. 1) залегают в виде даек, штоков и удлиненных, вытянутых тел мощностью от первых десятков метров до 0,5 км, и протяженностью до 4 – 6 км. Их тела прорывают осадки позднекарбонового и раннепермского возраста (кинырчатская, гималдыкская свиты) и с разрывом перекрыты раннеюрскими осадками. Возрастной интервал образования пород ЧК по геологическим данным поздняя пермь – ранний триас. Считается, что ЧК является представителем самостоятельного кратковременного этапа магматической активизации, оторванного от раннепермского вулканизма ПХ, плутонических образований Карачаево-Черкесского горст – антиклинория и горст – антиклинория Главного хребта. Предполагается вероятная связь магматитов ЧК с одной из фаз индосинийского тектогенеза – преднорийской (лабинской) либо предплинсбахской. По породам ЧК местами развиваются зоны гидротермальных изменений с сульфидной вкрапленностью [Письменный и др., 2004; Омельченко, 2021].

Материал и методы его исследования

Изучена коллекция образцов, собранная в 2019, 2020 и 2023 гг. по долинам рек Суарык, Малка, Кубань, Даут, и на северном фланге Тырныаузского W-Мо месторождения в районе перевала «Сурьма». Аналитические данные получены в ЦКП «ИГЕМ–Аналитика» методами: рентгено – флуоресцентного анализа (*XRF*) на спектрометре «Респект-100» (23 пробы) и спектроскопии с индукционно-связанной плазмой (*ICP-MS*) на масс – спектрометре *X-Series II* (8 проб). Контроль точности анализов осуществлялся с использованием российских и международных стандартов применяемых в ЦКП «ИГЕМ–Аналитика». Потери при прокаливании (*ППП*) для (*XRF*) определены обычным весовым методом. Определение содержания благородных металлов (12 проб) проводилось в Лаборатории физико-химических и химических методов анализа ИМГРЭ методом *ICP MS* на Elan 6100 DRC с использованием стандартного раствора Perkin Elmer Pure Plus Atomic; Standard № 9300234 с пределами обнаружения (в г/т): Au – 0.002; Ru – 0.001; Pt – 0.01; Pd – 0.01; Ag – 0.01. При построении диаграмм дополнительно использовались силикатные анализы пород ЧК (19 проб) приведенные в отчетах ФГУГП «Кавказгеолсъемка». Изучение образцов включало их петрографическое описание, расчеты геохимических характеристик, построение и анализ диаграмм.

Полученные результаты

Согласно классификационной диаграмме (Na_2O+K_2O) – SiO_2 (рис. 2) фигуративные точки (ФТ) составов изученных интрузивов ЧК по данным RFA (табл. 1) группируются в зоне умеренно-щелочных пород (Na_2O+K_2O от 7,01 до 9,28; Σ/n 7,75% $n=23$), преимущественно в поле граносиенитов. Реже ФТ отмечаются в поле монцонитов и по данным силикатных анализов ФГУГП «Кавказгеолсъемка» в поле гранодиоритов. Граносиениты, граносиенит – порфиры и монцониты имеют порфировидную, сериально- и гломеропорфировую структуру. В наиболее крупных телах структура пород гипидиоморфнозернистая.

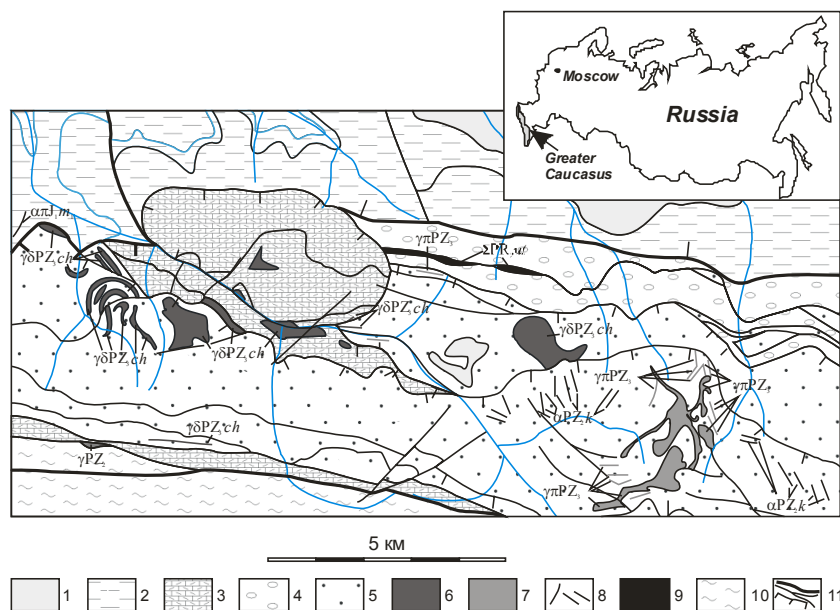


Рис. 1. Схематическая геологическая карта района распространения интрузий чучкурского комплекса в верховьях р. Худес (по материалам ФГУГП «Кавказгеолсъемка», лист К-38-1, VII. 2004 г.)

Условные обозначения. 1-5 Разновозрастные толщи, вулканогенных и осадочных пород:

- 1 – Плиоцен-четвертичные; 2 – Ранне-среднеюрские; 3 – Раннепермские; 4 – Позднекарбоновые;
 5 – Ранне-среднедевонские; 6-9 Магматические породы: 6 – Позднепермские граносиениты чучкурского комплекса; 7 – Позднекарбоновые лейкограниты кубанского комплекса;
 8 – Среднепалеозойский кызылкольский субвулканический комплекс; 9 – Серпентиниты;
 10 – Метаморфические породы; 11 – Геологические границы /

Fig. 1. Schematic geological map of the intrusion area of the Chuchkur complex in the upper reaches of the Khudes river (based on the materials of the FSUGE "Kavkazgeols'emka", sheet K-38-1, VII. 2004).

Legend. 1-5 Strata of volcanogenic and sedimentary rocks of different ages: 1 – Pliocene-Quaternary; 2 – Early-Middle Jurassic; 3 – Early Permian; 4 – Late Carboniferous; 5 – Early-Middle Devonian; 6-9 Igneous rocks: 6 – Late Permian granosienites of the Chuchkur complex; 7 – Late Carboniferous leucogranites of the Kuban complex; 8 – Middle Paleozoic Kyzylkol subvolcanic complex; 9 – Serpentinites; 10 – Metamorphic rocks; 11 – Geological boundaries

Вкрапленники представлены плагиоклазом (10-20%), амфиболом (3-7%), реже кварцем (1-3%), и иногда калиевым полевым шпатом (КПШ). Плагиоклаз (олигоклаз), присутствует в виде широкотаблитчатых в разной степени серицитизированных кристаллов и их сростков, содержит включения карбоната *in situ* и роговой обманки. Амфибол (роговая обманка) присутствует в виде удлиненных кристаллов размером до 0,2×2,0 мм, замещается хлоритом (клинохлор) реже эпидотом. Основная масса (ОМ) существенно полевошпатовая, гипидиоморфнозернистая и аллотриаморфнозернистая (70-80%), состоит из альбит-олигоклаза, КПШ, кварца, иногда с примесью роговой обманки, мусковита, хлорита, эпидота. Акцессорные и рудные минералы апатит, сфен, рутил, магнетит, пирит. Иногда в породе отмечаются карбонатные и кварц – хлорит – альбитовые микропрожилки. В позднем альбит-олигоклазе ОМ отмечены расшнурованные расплавные включения и первичные газово-жидкие включения. В некоторых случаях ОМ интенсивно серицитизирована. В случаях с гипидиоморфнозернистой структурой породы состоят из преобладающего серицитизированного плагиоклаза (олигоклаза), КПШ, реже кварца, в промежутках между минералами калиевого базиса хлорит, мусковит, эпидот, апатит, рудный минерал.

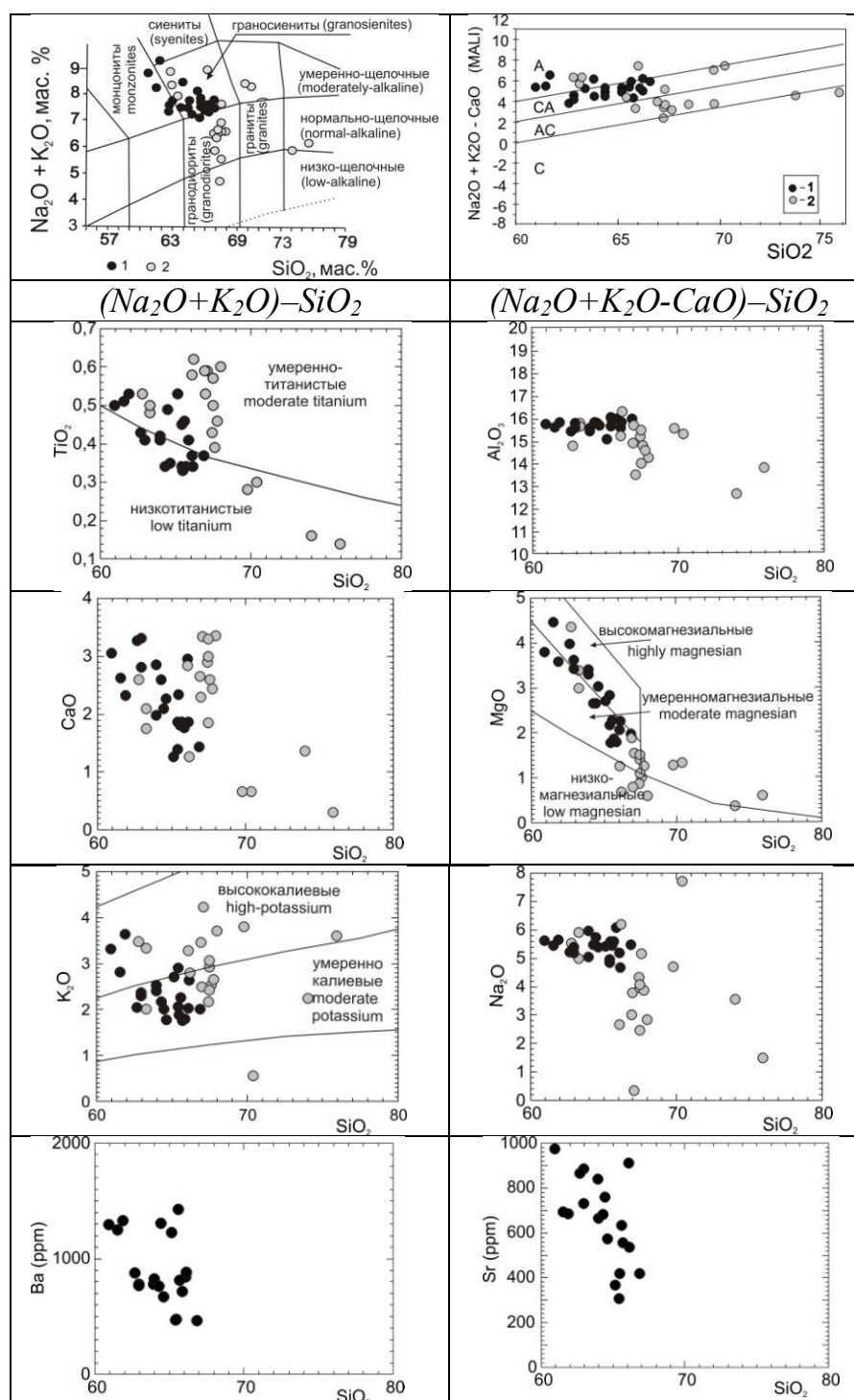


Рис. 2. Составы пород на классификационных диаграммах и диаграммах концентраций петрогенных компонентов (в мас. %).
Условные обозначения: На диаграмме $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}) - \text{SiO}_2$ поля гранитоидов: C – известковистых, AC – щелочно-известковистых, CA – известково-щелочных, A – щелочных. 1 – РФА. 2 – Силикатный анализ /

Fig. 2. Rock compositions on classification diagrams and diagrams of concentrations of petrogenic components (in wt %). Legend: In the diagram $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}) - \text{SiO}_2$ fields of granitoids: C – calcareous, AC – alkaline-calcareous, CA – calcareous-alkaline, A – alkaline.
1 – XRF. 2 – Silicate analyses

Таблица 1/ Table 1

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

Sample	9/19	10/19	11/19	49/19	51/19	53/19	1/23	3/23
SiO ₂	65,16	61,89	60,94	63,94	62,7	62,98	64,45	65,60
TiO ₂	0,53	0,53	0,5	0,42	0,43	0,41	0,49	0,46
Al ₂ O ₃	15,1	15,85	15,76	15,45	15,45	15,79	15,79	15,98
Fe ₂ O ₃	4,06	3,78	3,91	3,6	4,02	3,65	3,03	2,69
MnO	0,13	0,07	0,08	0,06	0,08	0,06	0,06	0,06
MgO	2,7	3,59	3,79	3,41	3,97	3,42	2,65	2,28
CaO	1,27	2,33	3,05	2,86	3,27	3,31	2,10	1,81
Na ₂ O	5,42	5,65	5,61	5,06	5,23	5,39	5,74	5,46
K ₂ O	2,7	3,63	3,31	2,52	2,05	2,29	2,01	2,26
P ₂ O ₅	0,24	0,36	0,36	0,19	0,22	0,2	0,31	0,29
ППП	2,29	1,84	2,07	2,16	2,24	2,21	2,86	2,57
Сумма / Sum	99,66	99,59	99,54	99,67	99,66	99,71	99,49	99,46
Cr	84	103	114	105	119	103	106	105
V	96	94	87	80	84	81	94	89
Co	17	12	14	11	18	15	14	13
Ni	45	66	73	71	80	60	52	51
Cu	65	17	36	14	<10	17	16	16
Zn	50	57	87	59	51	50	60	57
Pb	37	58	62	14	21	17	27	20
Rb	55	82	76	61	50	58	47	54
Sr	366	686	973	838	864	732	760	634
Ba	1228	1332	1297	781	876	769	1306	1428
Zr	159	183	173	120	120	124	193	196
Y	14	15	19	10	16	14	15	16
Li	31	22,6	29,2	21,9	22,3	33,5	17,9	15,3
Be	1,9	33,0	3,1	1,7	1,8	2,0	2,6	2,5
Sc	7,2	7,4	8,9	8,8	10,6	9,7	8,2	7,1
Ti	3047	2805	3055	2852	2503	2433	2930	2806
Nb	7	9	10	6	7	5	10	10
Mo	1,4	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,3
Sn	1,5	1,2	1,6	1	1,1	1,4	1,2	1,2
Sb	1,4	0,3	0,3	0,2	0,4	0,4	0,5	0,3
Cs	0,7	0,9	1,2	2,0	2,3	2,6	2,5	2,6
La	30,1	61,9	63,2	25,5	26,5	25,7	45,7	47,2
Ce	63,8	123,7	125,8	52,8	55,4	54	92,1	89,6
Pr	7,9	14,2	14,4	6,5	6,5	6,2	9,8	9,9
Nd	30,6	52,1	53,6	25,2	26,1	24,9	40,3	39,5
Sm	5,5	8,6	8,8	4,6	4,9	4,6	6,9	6,9
Eu	1,4	2,3	2,4	1,3	1,4	1,3	2,0	2,0
Gd	4,3	6,3	6,4	3,9	4,0	3,7	4,9	5,0
Tb	0,5	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7
Dy	2,4	3,0	3,2	2,3	2,4	2,2	2,7	2,9
Ho	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6
Er	1,2	1,3	1,4	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3
Tm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Yb	1,0	1,0	1,1	1,0	1,1	1,0	1,0	1,1
Lu	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,17	0,16
Hf	4,0	5,4	6,1	3,7	3,6	3,8	5,4	5,9
Ta	0,47	0,45	0,5	0,16	0,27	0,25	0,54	0,51
W	1,6	1,1	1,5	0,1	1,0	1,3	4,6	1,7
Bi	0,26	0,34	0,97	0,15	0,03	0,04	0,02	0,06
Th	9,8	25,58	26,67	9,0	8,96	8,64	15,86	15,72
U	3,3	7,2	7,8	2,0	2,5	2,5	4,9	4,9

Примечание: 9/19, 10/19, 11/19, 49/19, 51/19, 53/19, 1/23, 3/23 – граносиениты. Место отбора образцов: 9/19, 10/19, 11/19 – р. Кубань; 49/19, 51/19, 53/19 – р. Малка; 1/23, 3/23 – р. Даут. /

Note: 9/19, 10/19, 11/19, 49/19, 51/19, 53/19, 1/23, 3/23 – granosienites. Sampling sites: 9/19, 10/19, 11/19 – Kuban river; 49/19, 51/19, 53/19 – Malka river; 1/23, 3/23 – Daut river.

На диаграмме $(Na_2O+K_2O-CaO)-SiO_2$ [Frost et al., 2001] (рис. 2) ФТ граносиенитов группируются в поле известково-щелочных и щелочных пород. На диаграммах SiO_2 – *петрогенные элементы* отмечается, что породы относятся к умеренно- и низкотитанистым; умеренно- и высокомагнезиальным $Mg^\#$ 0,57–0,69 ($\Sigma/n = 0,63$); умереннокалиевым образованиям K_2O от 1,76 до 3,63 ($\Sigma/n = 2,36\%$). Они характеризуются низкими содержаниями CaO от 1,2 до 3,2%, высокими содержаниями Na_2O от 4,67 до 6,07 ($\Sigma/n = 5,4\%$). Это пересыщенные глиноземом $(CaO+Na_2O+K_2O) < Al_2O_3$; $Al^I = 1,8-3,4$ породы с калиево-натриевым типом щелочности. Na_2O/K_2O 1,7–3,4. Индикаторные отношения геохимически сходных элементов $Zr/Hf = 33$. $K/Rb = 351$ указывают на возможную дифференциацию расплавов. U/Th отношение $(0,27-0,43) < 1$ указывает на неизменность составов пород вторичными процессами. Следует отметить, что для граносиенитов ЧК характерны высокие содержания: Ba 461–1428 ($\Sigma/n = 921$ ppm); Sr 366–973 ($\Sigma/n = 658$ ppm); Gr 50–137 ($\Sigma/n = 97$ ppm); Ni 31–93 ($\Sigma/n = 60$ ppm); $Mg^\#$ 0,63. Известно, что с интрузивами ЧК ассоциируют золотосодержащие рудные объекты; в связи с этим в граносиенитах проведено определение содержаний благородных металлов (табл. 2). Содержание Au в породе варьирует здесь от 0,002 до 0,074 г/т ($\Sigma/n = 0,012$ г/т). Ag от менее 0,01 до 0,074 г/т ($\Sigma/n = 0,0435$ г/т).

Таблица 2/ Table 2

Содержание благородных металлов в граносиенитах (в г/т) /
The content of precious metals in granosienites (in ppm)

Sample	5/20	9/20	11/20	11/19	49/19	51/19	52/19	53/19	1/23	2/23	3/23	4/23
Ru	0,009	0,011	0,003	0,006	0,001	0,001	0,001	0,007	0,003	0,002	0,002	0,002
Pd	<0,01	<0,01	<0,01	0,016	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,019	0,138	<0,01
Ag	0,02	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,074	0,065	0,049	0,033
Pt	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Au	0,005	0,074	0,022	0,002	0,002	0,002	0,002	0,009	0,002	0,003	0,016	0,006

Место отбора образцов: 5/20, 9/20, 11/20 – р. Суарык; 11/19 – р. Кубань; 49/19, 51/19, 52/19, 53/19 – р. Малка; 1/23, 2/23, 3/23, 4/23 – р. Даят. / Sampling location: 5/20, 9/20, 11/20 – Suaryk river; 11/19 – Kuban river; 49/19, 51/19, 52/19, 53/19 – Malka river; 1/23, 2/23, 3/23, 4/23 – Daut river.

На дискриминационной диаграмме (ДД) $FeO_T/(FeO_T+MgO)-SiO_2$ [Frost et al., 2001] (рис. 3), где показана линия разграничения магнезиальных и железистых гранитоидов ФТ ЧК группируются в области магнезиальных образований, в пограничной зоне между гранитами S и I типа. Сравнение содержаний оксидов и типоморфных элементов с эталонами гранитов M, I, S, A – типа и геохимическими типами гранитоидов по Л.В. Тауссону [Туркина, 2014; Гусев, 2012] показывает, что породы ЧК отличаются от этих стандартов. Отметим, что в настоящее время выделяют и другие типы гранитоидов, с понятной геодинамической позицией и исходным плавящимся субстратом. Наиболее известны – шошониты (SH), адакиты (AD) и санукитоиды (SN) [Гусев, 2012; Martin et al., 2005]. Сравнение с шошонитами показывает, что граносиениты ЧК при равных SiO_2 , Al_2O_3 отличаются более высоким MgO и более низкими Na_2O+K_2O , Rb , Ba , Sr , Th , Zr , Y и $(K_2O/Na_2O) < 1$. На ДД $Rb/30 - Hf-Ta \times 3$ [Harris et al., 1986] ФТ ЧК группируются в поле VAG гранитов вулканических дуг. На ДД $Sr/Y - Y$ [Defant, Drummond, 1990] в поле адакитов. На ДД $Sr-(SiO_2/MgO) \times 100 - K/Rb$ [Martin et al., 2005] в поле высококремнистых адакитов.

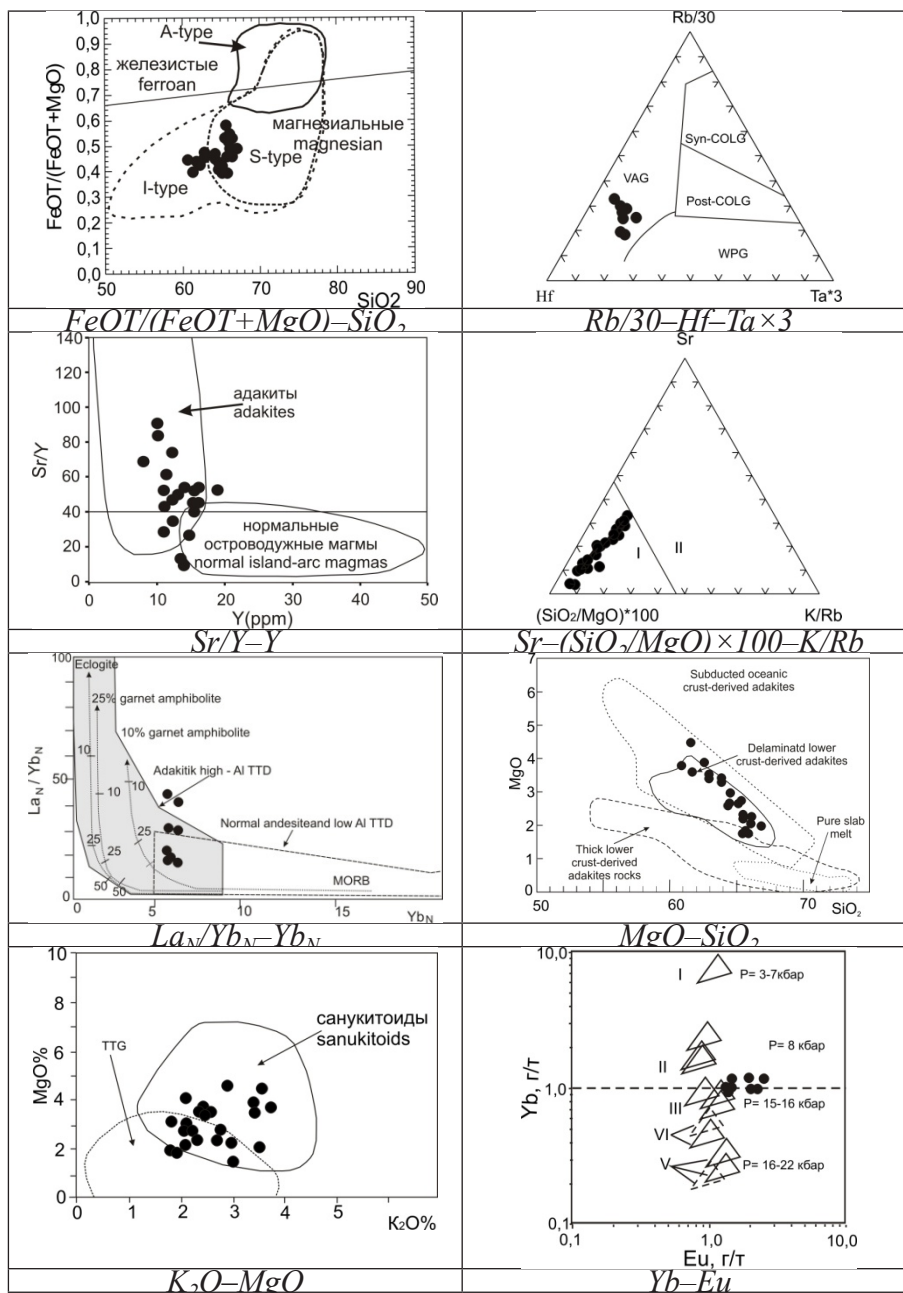


Рис. 3. Составы пород на петрогенетических диаграммах.

Условные обозначения: На диаграммах $Rb-(Y+Nb)$, $Rb/30-Hf-Ta \times 3$: VAG – граниты вулканических дуг, syn-COLG – граниты синколлизийные, post-COLG – граниты постколлизийные, WPG – граниты внутриплитные. На $Sr-(SiO_2/MgO) \times 100-K/Rb$ поля адакитов: I – высококремнистых, II – низкокремнистых. На $Yb-Eu$ P – давление в кбар /

Fig. 3. Rock compositions on petrogenetic diagrams. Legend: On the diagrams $Rb-(Y+Nb)$, $Rb/30-Hf-Ta \times 3$: VAG – granites of volcanic arcs, syn-COLG – syncollisional granites, post-COLG – postcollisional granites, WPG – intraplate granites. On $Sr-(SiO_2/MgO) \times 100-K/Rb$ adakite fields: I – high-siliceous, II – low-siliceous. On $Yb-Eu$ P is the pressure in kbar

На ДД La_N/Yb_N-Yb_N в поле высокоглиноземистых, тоналит – трондjemит – даци-товых адакитов, нанесены тренды плавления исходных пород [Defant, Drummond, 1990; Xu et al., 2000]. Заметно, что ФТ ЧК здесь смещены относительно трендов плавления гранатовых амфиболитов и эклогитов. Это, по-видимому, указывает на иной, более сложный генезис исходных расплавов. На ДД $MgO-SiO_2$ [Gan et al.,

2022] ФТ ЧК группируются в поле адакитов, образовавшихся при литосферной деляминации. На ДД K_2O-MgO [Martin et al., 2005] ФТ ЧК сконцентрированы в поле санукитоидов. На ДД $Yb-Eu$ [Туркина, 2000] ФТ ЧК расположены вблизи треугольных полей модельных составов, образующихся в результате плавления исходных пород при давлениях $\sim 15-16$ кбар, что соответствует ориентировочно глубине 52-56 км. Редкие земли (REE) пород ЧК (рис. 4) нормированные к хондриту [Sun, McDonough, 1989] образуют фракционированные тренды распределения, без европиевого минимума. По содержанию и распределению REE, они близки с аналогичными трендами пород фанерозойской Ba-Sr – габбро-гранитной серии и трендами позднеархейских санукитоидов [Егорова, 2013]. La_n/Yb_n отношение (показатель степени фракционирования REE) 17,9–42,3. La_n/Sm_n 3,4–4,6. Gd_n/Yb_n 3,0–5,2. Eu/Eu^* где $(Eu^* = (Sm_n + Gd_n)/2)$ 0,8–0,9. $\sum REE$ г/т 126–513 $\sum/n = 188$. На мультиэлементных спайдер-диаграммах, где показаны несовместимые элементы, нормированные по N-MORB [Sun, McDonough, 1989], можно отметить следующее: 1 – высокое содержание крупноионных литофильных Rb, Ba, K, Sr и радиоактивных элементов Th, U; 2 – пониженные концентрации тяжелых редкоземельных элементов HREE и Y; 3 – негативные аномалии Ta, Nb, P и Ti.

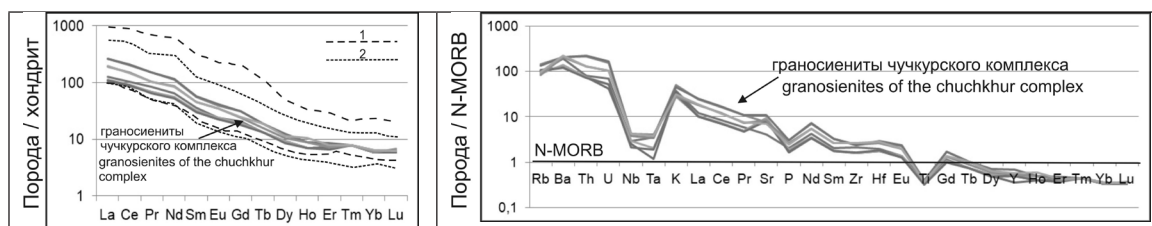


Рис. 4. Составы пород на спайдер-диаграммах.

Примечание. Концентрации несовместимых элементов нормированы по N – MORB, концентрации REE нормированы к хондриту по [Sun, McDonough, 1989]. Содержание и распределение REE в: 1 – санукитоидах Балтийского щита; 2 – породах фанерозойской Ba-Sr-габбро-гранитной серии [Егорова, 2013] /

Fig. 4. Compositions of rocks on spider diagrams. Note. Concentrations of incompatible elements normalized to N – MORB, REE concentrations normalized to chondrite according to [Sun, McDonough, 1989]. The content and distribution of REE in: 1 – sanukitoids of the Baltic Shield; 2 – rocks of the Phanerozoic Ba-Sr-gabbro-granite series [Egorova, 2013]

Кларки концентрации элементов ($K_k \geq 1,0$) рассчитаны по сравнению с кларками кислых пород [Гусев и др., 1999] в связи с тем, что в ЧК $\sum/n SiO_2 = 64,3\%$. Ранжированный ряд K_k имеет следующий вид: $Ni_{7,7}$; $Cr_{7,4}$; $Au_{6,0}$; $Sr_{2,7}$; $Ba_{1,6}$; $Sb_{1,6}$; $Pb_{1,6}$; $Ti_{1,4}$; $Co_{1,4}$; $Sc_{1,2}$; $Ag_{1,1}$; $V_{1,1}$; $Zn_{1,0}$. Сравнение концентраций элементов с петрохимическими типами пород 12 эталонных геодинамических обстановок [Гусев и др., 1999] показывает, что ЧК условно можно сопоставить с образованиями коллизионных вулcano-плутонических поясов.

Обсуждение результатов

Согласно с геодинамической моделью региона [Греков, Пруцкий, 2001] Позднегерцинский структурный ярус (карбон-пермь) выступает в качестве неоавтохтона. Наиболее полно он развит в грабен-синклинии ПХ. Предполагается, что: ранний карбон – это этап коллизии субдукционного типа; карбон-ранняя пермь – активная окраина континента (АКО) «Андийского типа»; нижняя пермь–низы верхней

перми – континентальный рифтогенез в пределах АКО; поздняя пермь и триас на Западном Кавказе – эпиконтинентальный морской бассейн. С индосинийской коллизией обычно связывают образование поздне триасового, диорит-гранодиоритового «цейского» комплекса, расположенного в зоне Главного хребта на границе Центрального и Восточного Кавказа [Греков и др., 2006]. Изученные граносиениты ЧК распространены в восточной части зоны ПХ БК, они внедрялись в заключительный период формирования палеозойского фундамента Скифской плиты (СП). Для пород характерны высокие содержания: Ba , Sr , Gr , Ni , Au , MgO ($\Sigma/n Mg^\# 0,63$), $LiLe$, $LREE$, La/Yb 18–42, при пониженных $HREE$ и Rb/Sr 0,08, K_2O/Na_2O 0,4–0,6. По содержанию петрогенных оксидов и ряда индикаторных элементов граносиениты ЧК отличаются от гранитов М, I, S, A, SH – типа. На диаграммах ФТ ЧК тяготеют к полям гранитов адакитового и санукитоидного типа. В связи с этим рассмотрим этот момент подробнее. К адакитовому типу гранитов (АД) относят специфические кислые интрузивные породы, обнаруживающие сходство с эффузивными адакитами. Для эффузивных адакитов показательны: высокие – $SiO_2 > 56\%$, $Al_2O_3 > 15\%$, Sr , $LiLe$, La/Yb ; $Sr/Y > 40$ и низкие – $Y < 18$ г/т и $Yb < 1,8$ г/т; $HFSE (Nb, Ta)$ и $HREE$. Существуют различные представления о происхождении адакитовых расплавов. Это результат: – плавления океанической плиты и последующего взаимодействия расплава с породами мантии и континентальной коры; – плавления мантийного перидотита в безводных условиях; – частичного плавления утолщенной нижней коры; – плавления деламинированной, мафической нижней коры [Defant, Drummond, 1990; Авдеенко и др., 2011; Гусев, 2012, 2014; Gan et al., 2022]. В различных регионах мира с АД ассоциируют порфировые и эпитермальные, медные и различного типа золоторудные месторождения [Гусев, 2014]. Санукитоиды (SN), это специфическая группа высокомагнезиальных магматических пород обогащенных Ba , Sr , $LREE$, и щелочами. Обычно это поздние и пост кинематические образования. Их внедрение является одним из последних магматических событий в уже кратонизированной континентальной коре. SN выплавляются из мантийного источника – метасоматизированных перидотитов. Геохимические критерии для выделения SN: SiO_2 55–67% (в однофазных комплексах 60%), $K_2O > 1,0\%$, $Mg^\# > 0,6$, $Gr \geq 200$ ppm, $Ni \geq 80$ ppm, $Ba > 1000$ ppm, $Sr > 1000$ ppm, $La > 40$ ppm, отсутствие или незначительные Eu аномалии, $Rb/Sr < 0,1$. Умеренно и известково-щелочные SN имеют более низкие $LiLe$, $LREE$, Sr 400–1000 ppm, Nd 28 ppm, $K_2O/Na_2O < 0,7$ [Martin et al., 2005; Heilimo et al., 2010; Егорова, 2010]. Приведенные выше геохимические данные, указывают на верхне-мантийную (субконтинентальная литосферная мантия) генерацию исходного расплава, за счет метасоматизированных перидотитов, при вероятном участии эклогитов деламинированной нижней коры, на глубине 52–56 км. Следует также отметить, что массивы ЧК распространены в зоне ПХ практически в пределах Транскавказского поперечного поднятия (ТПП), возраст которого считается спорным. Однако, в ее пределах по геофизическим данным отмечается повышенный тепловой поток и приподнятое положение границы Мохоровичича. Субширотная ориентация пояса, по-видимому, следует объяснять близостью регионального «Северного разлома» субширотного простираия. Иными словами, предполагается, что с ТПП связана зона активизированной или «возбужденной» мантии [Шолпо, 1978; Большой Кавказ ..., 2007]. Исходя из выше обозначенных особенностей геохимического состава граносиенитов ЧК, их возрастной (заключительный период формиро-

вания палеозойского фундамента СП) и геологической позиции (в пределах ТПП) мы считаем, что их следует относить к гранитоидам санукитоидного типа.

По данным геологических отчетов ФГУГП «Кавказгеолсъемка» г. Ессентуки с породами ЧК ассоциируют сульфидные зоны не колчеданного типа, в которых присутствует пирит, магнетит, титаномагнетит, лелингит, арсенопирит и незначительные количества < 1% сфалерита, халькопирита, мушкетовита, гематита и блеклых руд. Золото установлено в пирите и в околорудных метасоматитах. Содержание *Au* в метасоматитах колеблется от 0,1 до 2–3 г/т. Содержание пирита в сульфидных зонах составляет от 1–4% до 12–13% объема породы. В монофракциях пирита, отобранных по сульфидным зонам и в массивах гранодиоритов на удалении от рудных объектов установлены повышенные содержания *Au* (до 8–10 г/т) и *As*. Предположительно – формационный тип рудопроявлений «золото – полисульфидно-кварцевый» с элементами адуляр кварцевого.

Заключение

Изучены петрохимические особенности позднепермских гипабиссальных граносиенитов распространенных в восточной части Передового хребта Большого Кавказа. Установлено, что они являются умеренно-щелочными, высокомагнезиальными, умеренно калиевыми образованиями с калиево-натриевым типом щелочности. Показано, что они относятся к группе гранитоидов санукитоидного типа и характеризуются повышенными концентрациями *Cr*, *Ni*, *Nd*, *LiLe*, *LREE*, *Mg[#]*, *La/Yb*. Предполагается, что исходные расплавы граносиенитов формировались в литосферной мантии на глубине 52–56 км, при плавлении метасоматизированных перидотитов и возможном участии эклогитов деламинированной нижней коры. Отмечено, что с гипабиссальными граносиенитами чучкурского комплекса ассоциируют золотосодержащие сульфидные зоны не колчеданного типа, в которых присутствуют пирит, лелингит и в незначительных количествах < 1% (арсенопирит, сфалерит, халькопирит, блеклые руды).

Литература

1. Авдеенко Г.П., Палуева А.А., Кувикас О.В. Адакиты в зонах субдукции Тихоокеанского кольца: Обзор и анализ геодинамических условий образования. // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. – 2011. – Вып. 17. – С. 45–60.
2. Большой Кавказ в альпийскую эпоху. / Редактор Ю.Г. Леонов. – М: ГЕОС, 2007. – 368 с.
3. Греков И.И. Пруцкий Н.И. Проблемы геодинамики и металлогении Центрального Кавказа в позднегерцинский – триасовый этап развития Северного Кавказа. // Проблемы геологии и геоэкологии Южно-Российского региона. Новочеркасск: НАБЛА, 2001. – С. 4–15.
4. Греков И.И., Письменный А.И., Энна Н.Л. Термодинамика Ардонской очаговой зоны на Большом Кавказе. // Региональная геология и металлогения. – 2006. – С. 48–59.
5. Гусев А.И. Петрология адакитовых гранитоидов. М.: Изд. Академия Естествознания, 2014. – 133 с.
6. Гусев А.И. Петрология золотогенерирующего магматизма. М.: Изд. Академия Естествознания, 2012. – 126 с.
7. Гусев Г.С., Кудрявцев Ю.К., Гущин А.В. и др. Геохимическая и металлогеническая специализация структурно-вещественных комплексов. СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. – 514 с.
8. Егорова Ю.С. Позднеархейские серии умеренно-щелочных пород Карелии на примере санукитоидного Эльмусского и сиенитового Западно-Хижъярвинского массивов. // Сборник трудов молодых ученых ИГГД РАН. – 2010. – С. 134–160.

9. Егорова Ю.С. Фанерозойские аналоги архейских санукитоидов Балтийского щита. // Материалы XXIV молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти К.О. Кратца. Апатиты: К & М, 2013. – С. 92–95.
10. Омельченко В.Л. Офиолиты Северного Кавказа и некоторые проблемы геологии его древних комплексов. Ессентуки, 2021. – 167 с.
11. Письменный А.Н., Пичужков А.Н., Зарубина М.А. и др. Государственная геологическая карта РФ. К-38-I, VII (Кисловодск). Издание второе. Кавказская серия. Объяснительная записка. СПб., 2004. – 259 с.
12. Туркина О.М. Лекции по геохимии магматического и метаморфического процессов: учебное пособие. – Новосибирск: РИЦ НГУ, 2014. – 118 с.
13. Туркина О.М. Модельные геохимические типы тоналит-трондьемитовых расплавов и их природные эквиваленты. // Геохимия. – 2000. – № 7. – С. 704–717.
14. Шолпо В.Н. Альпийская геодинамика Большого Кавказа. М.: Недра, 1978. – 160 с.
15. Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. // Nature. – 1990. – Vol. 347. – pp. 662–665.
16. Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J. et al. A geochemical classification for granitic rocks. // Journal of Petrology. – 2001. – Vol. 42. Issue 11. – pp 2033–2048.
17. Gan J., Xiong F., Xiao Q., Wang W., Yan D. Petrogenesis and geodynamic implications of late triassic mogetong adakitic pluton in East Kunlun orogen, Northern Tibet: Constraints from zircon U-Pb-Hf isotopes and whole-rock geochemistry. // Frontiers in Earth Science. – 2022. – Vol. 10. Art. No. 845763. DOI: 10.3389/feart.2022.845763.
18. Harris N.B., Pearce J.A., Tindle A.G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. // Geological Society. London. Special Publications. – 1986. – Vol. 19. – pp. 67–81.
19. Heilimo E., Halla J., Hölttä P. Discrimination and origin of the sanukitoid series: geochemical constraints from the Neoproterozoic western Karelian Province (Finland). // Lithos. – 2010. – Vol. 115. – pp. 27–39.
20. Martin H., Smithies R.H., Rapp R. et al. An overview of adakite, tonalite – trondhjemite – granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. // Lithos. – 2005. – Vol. 79. – pp. 1–24.
21. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts. // Geological Society. London. Special Publications. – 1989. – Vol. 42. – pp. 313–345.
22. Xu J.-F., Wang Q., Yu X.-Y. Geochemistry of high-Mg andesites and adakitic andesite from the Sanchazi block of the Mian-Lue ophiolitic melange in the Qilling Mountains, central China: Evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan crust. // Geochemical Journal. – 2000. – Vol. 34. – pp. 359–377.

References

1. Avdeenko G.P., Paluyeva A.A., Kuvikas O.V. Adakites in the subduction zones of the Pacific Rim: A review and analysis of geodynamic conditions of formation. Bulletin of KRAUNTS. Earth Sciences. 2011. Issue 17. pp. 45–60. (In Russ)
2. The Greater Caucasus in the Alpine epoch. Ed. Yu.G. Leonov. Moscow. GEOS. 2007. 368 p. (In Russ)
3. Grekov I.I., Prutsky N.I. Problems of geodynamics and metallogeny of the Central Caucasus in the Late Hercynian–Triassic stage of development of the North Caucasus. In: Problems of Geology and Geoecology of the South Russian region. Novocherkassk. NABLA. 2001. pp. 4–15. (In Russ)
4. Grekov I.I., Pismenny A.I., Enna N.L. Thermodynamics of the Ardon focal zone in the Greater Caucasus. Regional Geology and Metallogeny. 2006. pp. 48–59. (In Russ)
5. Gusev A.I. Petrology of adakite granitoids. Moscow. Academy of Natural Sciences. 2014. 133 p. (In Russ)
6. Gusev A.I. Petrology of gold-generating magmatism. Moscow. Academy of Natural Sciences. 2012. 126 p. (In Russ)

7. Gusev G.S., Kudryavtsev Yu.K., Gushchin A.V. et al. Geochemical and metallogenic specialization of structural and material complexes. Saint Petersburg. VSEGEI. 1999. 514 p. (In Russ)
8. Egorova Yu.S. Late Archean series of moderate-alkaline rocks of Karelia on the example of the sanukitoid Elmus and syenite West Khizhyarva massifs. In: Proceedings of Young Scientists of the Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS. 2010 pp. 134–160. (In Russ)
9. Egorova Yu.S. Phanerozoic analogues of Archean sanukitoids of the Baltic Shield. In: Materials of XXIV Youth Scientific school-conference devoted to the memory of K.O. Kratz. Apatity. K & M. 2013. pp. 92–95. (In Russ)
10. Omelchenko V.L. Ophiolites of the North Caucasus and some problems of the geology of its ancient complexes. Essentuki. 2021. 167 p. (In Russ)
11. Pismenny A.N., Pichuzhkov A.N., Zarubina M.A. et al. State geological map of the Russian Federation. K-38-I, VII (Kislovodsk). Second edition. Caucasian Series. Explanatory note. Saint Petersburg. 2004. 259 p. (In Russ)
12. Turkina O.M. Lectures on the geochemistry of magmatic and metamorphic processes: textbook. Novosibirsk. RIC NSU. 2014. 118 p. (In Russ)
13. Turkina O.M. Model geochemical types of tonalite–trondyemite melts and their natural equivalents. *Geochemistry*. 2000. No. 7. pp. 704–717. (In Russ)
14. Sholpo V.N. Alpine geodynamics of the Greater Caucasus. Moscow. Nedra. 1978. 160 p. (In Russ)
15. Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*. 1990. Vol. 347. pp. 662–665.
16. Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J. et al. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*. 2001. Vol. 42. Issue 11. pp 2033–2048.
17. Gan J., Xiong F., Xiao Q., Wang W., Yan D. Petrogenesis and geodynamic implications of late triassic mogetong adakitic pluton in East Kunlun orogen, Northern Tibet: Constraints from zircon U-Pb-Hf isotopes and whole-rock geochemistry. *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10. Art. No. 845763. DOI: 10.3389/feart.2022.845763.
18. Harris N.B., Pearce J.A., Tindle A.G. Geochemical characteristics of collision–zone magmatism. Geological Society. London. Special Publications. 1986. Vol. 19. pp. 67–81.
19. Heilimo E., Halla J., Hölttä P. Discrimination and origin of the sanukitoid series: geochemical constraints from the Neoproterozoic western Karelian Province (Finland). *Lithos*. 2010. Vol. 115. pp. 27–39.
20. Martin H., Smithies R.H., Rapp R. et al. An overview of adakite, tonalite – trondhjemite – granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*. 2005. Vol. 79. pp. 1–24.
21. Sun S.S., Mc Donough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts. Geological Society. London. Special Publications. 1989. Vol. 42. pp. 313–345.
22. Xu J.-F., Wang Q., Yu X.-Y. Geochemistry of high-Mg andesites and adakitic andesite from the Sanchazi block of the Mian-Lue ophiolitic melange in the Qilling Mountains, central China: Evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan crust. *Geochemical Journal*. 2000. Vol. 34. pp. 359–377.

УДК 517; 532

DOI: 10.46698/VNC.2025.68.22.002

Оригинальная статья

Математическое моделирование одного эффективного способа забора воды из определенного слоя двухслойного стратифицированного водоема

И.Д. Музаев^{1,2}, К.С. Харебов¹, Н.И. Музаев¹

¹ Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а;

² Владикавказский филиал Финансового университета при правительстве Российской Федерации, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Молодежная, 7,
e-mail: muzaevid@mail.ru

Статья поступила: 14.03.2025, доработана: 29.05.2025, принята к публикации: 03.06.2025

Резюме: Актуальность работы. В статье разработан новый эффективный способ селективного забора воды из определенного слоя двухслойного стратифицированного водоема. **Цель исследований.** Разработка нового эффективного способа селективного забора воды из определенного слоя двухслойного стратифицированного водоема. **Объект исследований.** Вода из слоев отводится двумя соосными трубами (труба в трубе). Наружная труба опущена в верхний слой. Внутренняя труба опущена в нижний слой. Прорезы труб находятся на одинаковом расстоянии от первоначального положения поверхности раздела слоев. Площадь поперечного сечения наружной трубы в два раза больше, чем площадь поперечного сечения внутренней трубы. **Метод исследования.** Составлена математическая модель селективного водозаборного процесса, когда вода достается через вышеуказанные две трубы. Модель представляет контактную начально-краевую задачу математической физики, составленную на базе теоретической гидромеханики в сочетании с методами источников и стоков. При заборе воды из определенного слоя общеизвестными способами по мере увеличения расхода (скорости) забираемой воды поверхность раздела сильно искривляется и поднимается либо опускается до проема водозаборной трубы, чем нарушается селективный водозаборный процесс. В результате аналитического решения начально-краевой задачи получена совокупность расчетных формул для уравнения искривленной поверхности раздела слоев. **Результаты исследования.** На базе полученной совокупности формул компьютерными вычислительными экспериментами доказано, что при синхронном заборе воды через обе трубы с одинаковыми расходами поверхность раздела не искривляется, сохраняя свое первоначальное горизонтальное положение при произвольных одинаковых значениях расхода забираемых вод. Таким образом, высокая эффективность разработанного в статье способа селективного забора воды становится доказанным утверждением. Способ позволяет забирать воду с высоким расходом из подходящего слоя для нужд водоснабжения.

Ключевые слова: стратифицированный водоем, критический расход, начально-краевая задача, метод источников и стоков, интегральное конечное интегральное преобразование Бесселя.

Для цитирования: Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И. Математическое моделирование одного эффективного способа забора воды из определенного слоя двухслойного стратифицированного водоема. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 21-32. DOI: 10.46698/VNC.2025.68.22.002

DOI: 10.46698/VNC.2025.68.22.002

Original paper

Mathematical modeling of one effective method of water intake from a certain layer of a two-layered stratified reservoir

I.D. Muzaev^{1,2}, K.S. Kharebov¹, N.I. Muzaev¹

¹ Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation;

² Vladikavkaz branch of the Financial University under the Government of the Russian Federation, 7 Molodezhnaya Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: muzaevd@mail.ru

Received: 14.03.2025, revised: 29.05.2025, accepted: 03.06.2025

Abstract: Relevance. The article develops a new effective method of selective water intake from a specific layer of a two-layered stratified reservoir. **Aim.** Development of a new effective method for selective water intake from a specific layer of a two-layer stratified reservoir. **The object of research.** The water from the layers is supplied by two coaxial pipes (pipe within a pipe). The outer pipe is lowered in the upper layer. The inner tube is lowered in the lower layer. The openings of the pipes are located at the same distance from the initial position of the interface of the layers. The cross-sectional area of the outer pipe is twice as large as the cross-sectional area of the inner pipe. **Methods.** A mathematical model of the selective water intake process has been compiled, when water is supplied through the above two pipes. The model is an initial boundary value problem of mathematical physics based on theoretical hydromechanics combined with the methods of sources and sinks. When water is drawn from a certain layer by well-known methods, as the flow rate (velocity) of the water being drawn increases, the interface strongly bends and rises or falls to the opening of the intake pipe, which disrupts the selective intake process. As a result of the analytical solution of the initial boundary value problem, a set of computational formulas for the equation of the curved interface of the layers is obtained. **Results.** Based on the obtained set of formulas, computer computational experiments have proved the statement that with synchronous water intake through both pipes with the same flow rates, the interface surface does not bend, retaining its original horizontal position with arbitrary identical flow rates of the collected waters. Thus, the high efficiency of the selective water intake method developed in the article becomes a proven statement. The method enables high-flow water withdrawal from a suitable layer for water supply needs.

Keywords: stratified reservoir, critical flow, initial boundary value problem, method of sources and sinks, integral finite integral Bessel transformation.

For citation: Muzaev I.D., Kharebov K.S., Muzaev N.I. Mathematical modeling of one effective method of water intake from a certain layer of a two-layered stratified reservoir. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 21-32. DOI: 10.46698/VNC.2025.68.22.002

Введение

Водоем, в котором вода по глубине состоит из нескольких слоев, отличающихся плотностью, мутностью, температурой либо химико-биологическим составом называется слоисто стратифицированным водоемом. Водозаборный процесс, когда вода из такого водоема забирается из определенного слоя, причем исключено по-

ступление воды в водозаборный проем из другого слоя, называется селективным водозаборным процессом. Если вода забирается из верхнего слоя двухслойного стратифицированного водоема и возмущенная поверхность раздела слоев достигает проема водозаборной трубы, то такое положение называется нижним критическим положением поверхности раздела слоев, при этом числовое значение расхода (скорости) забираемой воды называется критическим [Аверкиев и др., 1969; Музаев и др., 2020]. Аналогично вышесказанному, если вода забирается из нижнего слоя и при определенном значении расхода (скорости) забираемой воды поверхность раздела опускается до проема водозаборной трубы, то такое положение называется верхним критическим положением. Соответственно, числовое значение расхода (скорости) называется критическим значением расхода (скорости). Отсюда следует, что если в результате искривления поверхность раздела слоев принимает критическое положение, то этим нарушается селективный водозаборный процесс в определенном слое стратифицированного водоема.

Применение селективного способа забора воды из стратифицированного водоема часто бывает целесообразным [Музаев и др., 2020]. Например, для охлаждения конденсаторов турбин тепловых и атомных электростанций и отвода от них излишнего тепла в летнее время требуется подавать к ним воду из глубинных слоев стратифицированного водоема источника водоснабжения, где вода бывает холоднее на 8° – 10° по сравнению с температурой поверхностного слоя. При этом надо исключить возможность затекания воды в проем водозаборной трубы из верхнего теплого слоя. В случае сильного загрязнения нижнего слоя либо верхнего слоя необходимо забирать воду из такого слоя, где вода более чистая. При этом надо применять мероприятия так, чтобы вода из загрязненного слоя не затекала в водозаборный проем, что важно для сохранения экологического баланса и биологического разнообразия территорий [Губанов, 2022].

Краткий математический анализ развития методов расчета селективных водозаборных процессов, когда вода забирается из внутреннего пространства водоема

В специальных справочных литературных источниках, а также в приложении к строительным нормам и правилам [Заалишвили и др., 2024; Справочник ..., 1977] представлены полуэмпирические формулы, рекомендуемые для гидравлических расчетов и проектирования селективных водозаборных устройств. Для схемы водозабора, когда необходимо забирать воду трубой из внутреннего пространства верхнего осветленного слоя двухслойного водоема (рис. 1) рекомендуется руководствоваться эмпирической формулой И.Давидиана-И.Гловера [Аверкиев и др., 1969; Справочник ..., 1977; Сгауа, 1949; Методические ..., 2003; Музаев, 2024], которая имеет следующий вид:

$$Q_k = 1,42\pi \sqrt{gd \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \right)} \cdot Z_0^2, \quad (1)$$

где приняты следующие обозначения: Q_k – критическое значение расхода забираемой воды, d – диаметр водозаборной трубы, Z_0 – расстояние от первоначально горизонтальной плоскости раздела слоев воды до геометрического центра проема водозаборной трубы, ρ_1 и ρ_2 – плотности воды в верхнем и нижнем слоях соответственно, g – ускорение силы тяжести.

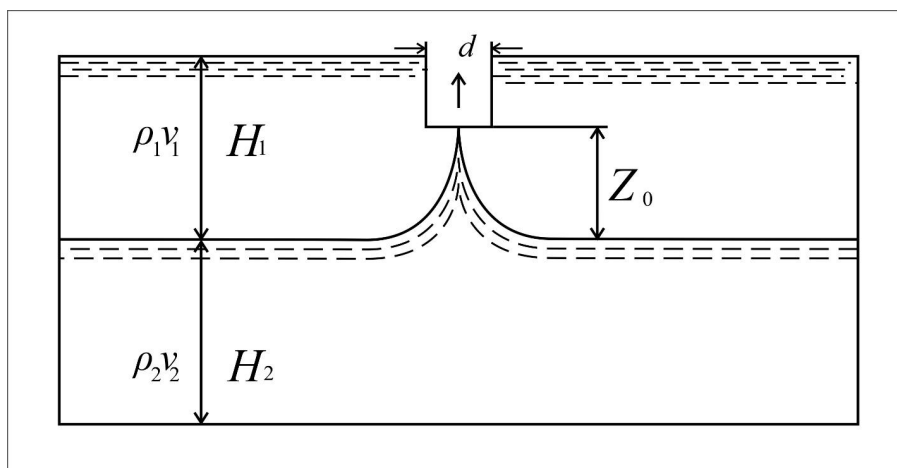


Рис. 1. Схема водозабора из верхнего осветленного слоя /

Fig. 1. Scheme of water intake from the upper clarified layer

Для схемы водозабора, когда вода забирается из нижнего слоя трубой подведенной через дно водоема (рис. 2), рекомендуется руководствоваться эмпирической формулой В.Харлемана [Harleman, Stolzenbach, 1972], которая имеет следующий вид:

$$Q_k = 0,51\pi \sqrt{\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1}} g H_2 \cdot Z_0^2, \quad (2)$$

где H_2 – толщина нижнего слоя воды, остальные обозначения разъяснены в формуле (1).

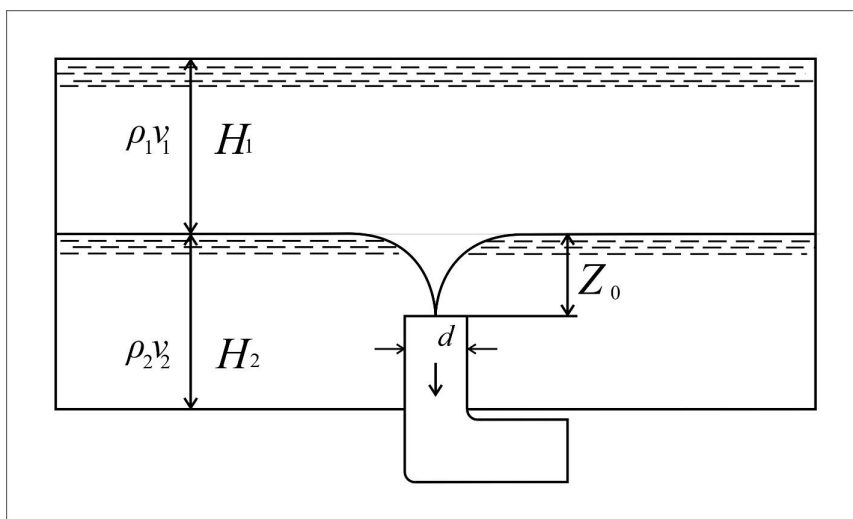


Рис. 2. Схема водозабора из нижнего слоя трубой подведенной через дно водоема /

Fig. 2. Scheme of water intake from the lower layer by a pipe connected through the bottom of the reservoir

В этих эмпирических формулах полностью отсутствуют толщины слоев воды и габаритные размеры водоема. Формула (2) применима только тогда, когда водозаборная труба подведена заподлицо с дном водоема. Из-за упомянутых недостатков расчет и проектирование на основе этих эмпирических формул в некоторых случаях могут не гарантировать селективность и рентабельность водозаборного устройства.

В данной статье разработан новый эффективный способ забора воды трубами из внутреннего пространства определенного слоя. При этом расход забираемой воды может быть в разы больше, чем критический расход. Способ основан на одновременном синхронном заборе воды из верхнего и нижнего слоев. Вода из верхнего слоя забирается трубой, опущенной через свободную поверхность водоема. Из нижнего слоя вода забирается другой трубой, проведенной вдоль центральной оси первой трубы, (т.е. – труба в трубе) подведенной к нижнему слою. Проемы труб находятся на одинаковом расстоянии от первоначального горизонтального положения плоскости раздела слоев. Ниже теоретически строго доказано утверждение о том, что при синхронном заборе воды через трубы с одинаковыми расходами поверхность раздела слоев не искривляется и практически сохраняет свое первоначальное горизонтальное положение. Этот гидродинамический эффект позволяет селективно забирать воду как из нижнего слоя, так и из верхнего слоя с повышением расхода в разы.

Постановка контактной начально-краевой задачи,
моделирующей селективный водозаборный процесс, когда
вода забирается вышепредставленным новым способом

Полагается, что в цилиндрической системе координат (r, z) , часть пространства, ограниченная условиями $0 < r < R$; $H_2 < z < H_1$ занята двухслойным стратифицированным водоемом с толщинами H_1 и H_2 верхнего и нижнего слоев соответственно, R – круговая протяженность водоема схематизированного в виде цилиндра радиуса R и высотой $H_1 + H_2$. Вода из верхнего слоя забирается через проем между наружной и внутренней соосными трубами. Из нижнего слоя вода забирается внутренней трубой. На рисунке 3 представлена расчетная схема поставленной начально-краевой задачи.

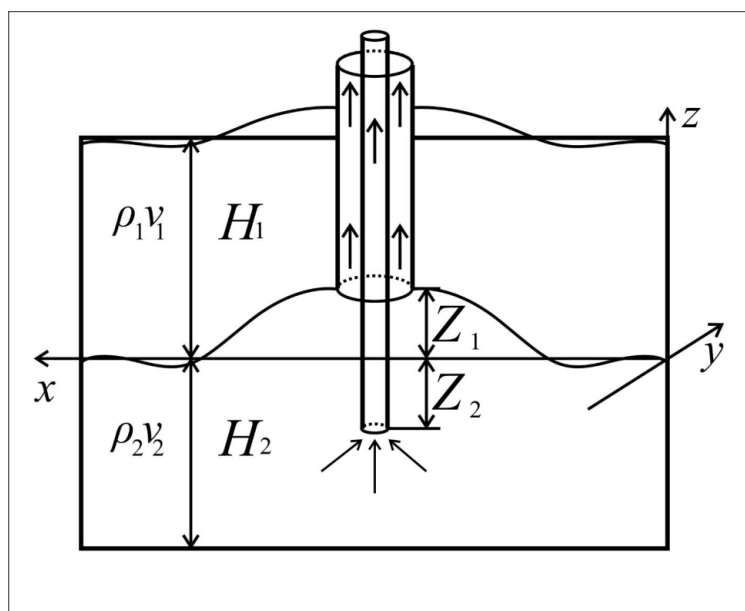


Рис. 3. Расчетная схема поставленной начально-краевой задачи /

Fig. 3. Calculation scheme of the initial boundary value problem

На рисунке 3 $(0, z_0)$ – координаты центра проема наружной трубы, $(0, -z_0)$ – координаты центра проема внутренней трубы. Через r_1 и r_2 обозначены плотности верхнего и нижнего слоев воды соответственно. Движение воды в слоях считается

безвихревым с учетом образования поверхностных и внутренних гравитационных волн [Karplus, 1956; Басниев и др., 1993; Маскет, 1953].

Используется гидродинамическая теория поверхностных и внутренних гравитационных волн [Шокин и др., 2015; Сретенский, 1977; Штеренлихт, 2004; Гавич, 1988; Чарный, 1968; Гинзбург, 1970; Белолипецкий и др., 1991] и метод источников и стоков [Garabedian, 1956].

Движение воды в слоях наиболее адекватно моделируется следующей начально-краевой задачей математической физики [Вазов, Форсайт, 1963; Музаев, Созанов, 1995; Корн, Корн, 1977; Кошляков и др., 1970; Ламб, 1947; Harleman, Stolzenbach, 1972; Букреев, 2010; Заалишвили, Музаев, 2023]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z^2} &= - \frac{q_1 f_1(r) Z_1(z)}{2\pi r_1 \varepsilon^2}, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial z^2} &= - \frac{q_2 f_2(r) Z_2(z)}{2\pi r_2 \varepsilon^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\varphi_1 = \varphi_2 = 0, \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = 0, \text{ при } t = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial r} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial r} = 0, \text{ при } r = 0 \text{ и } r = R. \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} &= 0, \text{ при } z = H_1; \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial z}, \text{ при } z = 0; \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} = 0, \text{ при } z = -H_2 \\ \rho_1 \left(\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} \right) &= \rho_2 \left(\frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} \right), \text{ при } z = 0, \end{aligned}$$

где приняты следующие обозначения и предположения: t – время; q_1 – расход воды, забираемый наружной трубой из верхнего слоя; r и z – цилиндрические координаты переменной точки; $q_1(t)$ – расход воды через наружную трубу, забираемый из верхнего слоя; $q_2(t)$ – расход воды, забираемый внутренней трубой из нижнего слоя; r_1 – радиус наружной трубы; r_2 – радиус внутренней трубы; ε – вспомогательная бесконечно малая величина; $f_1(r); f_2(r); Z_1(r); Z_2(r)$ – вспомогательные функции, позволяющие математически смоделировать процесс затекания воды в проемы труб на основе метода источников и стоков.

$$\begin{aligned} f_1(r) &= \begin{cases} 1, \text{ если } r \in (r_1; r_1 + \varepsilon) \\ 0, \text{ если } r \notin (r_1; r_1 + \varepsilon) \end{cases}, f_2(r) = \begin{cases} 1, \text{ если } r \in (r_2; r_2 + \varepsilon) \\ 0, \text{ если } r \notin (r_2; r_2 + \varepsilon) \end{cases} \\ Z_1(z) &= \begin{cases} 1, \text{ если } z \in (z_0 - \varepsilon; z_0) \\ 0, \text{ если } z \notin (z_0 - \varepsilon; z_0) \end{cases}, Z_2(z) = \begin{cases} 1, \text{ если } z \in (-z_0 - \varepsilon; -z_0) \\ 0, \text{ если } z \notin (-z_0 - \varepsilon; -z_0) \end{cases} \end{aligned}$$

Согласно правым частям дифференциальных уравнений (3) считается, что расход воды, который должен быть забран трубой, поглощается в объемном стоке в виде воображаемого кольцевого цилиндра с бесконечно малой высотой ε , а также с бесконечно малой толщиной кольцевого зазора ε .

Зависимости расходов воды от времени целесообразно задать следующими формулами:

$$q_2(t) = \begin{cases} q_1 \frac{t}{t_0}, \text{ если } 0 < t < t_0 \\ q_1, \text{ если } 0 < t \geq t_0 \end{cases}; \quad q_2(t) = \begin{cases} q_2 \frac{t}{t_0}, \text{ если } 0 < t < t_0 \\ q_2, \text{ если } t \geq t_0 \end{cases}, \quad (6)$$

где t_0 – промежуток времени открытия водозаборных труб.

При известных потенциалах j_1 и j_2 уравнение искривленной поверхности раздела слоев определяется дифференцированием j_1 и j_2 по времени, согласно формуле:

$$\eta(r, t) = \frac{1}{(\rho_2 - \rho_1)g} \left(\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} - \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} \right), \text{ при } z = 0. \quad (7)$$

Решение поставленной начально-краевой задачи (1)–(5)

С самого начала последовательно применены интегральное преобразование Лапласа по времени t и конечное интегральное преобразование Бесселя по переменной r . В результате начально-краевая задача привелась к решению следующей контактной краевой задачи для двух дифференциальных уравнений второго порядка.

$$\frac{d^2 \tilde{\varphi}_{1,n}}{dz^2} - \lambda_n^2 \tilde{\varphi}_{1,n} = -\frac{\tilde{q}_1}{2\pi\varepsilon} J_0 \left(\mu_n \frac{r_1}{R} \right) Z_1(z); \quad (8)$$

$$\frac{d^2 \tilde{\varphi}_{2,n}}{dz^2} - \lambda_n^2 \tilde{\varphi}_{2,n} = -\frac{\tilde{q}_2}{2\pi\varepsilon} J_0 \left(\mu_n \frac{r_2}{R} \right) Z_2(z);$$

$$\tilde{\varphi}_{i,n}(z) = \int_0^\infty \int_0^R \varphi_i r J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) dt dr, \quad i=1,2 \quad (9)$$

$$P^2 \tilde{\varphi}_{1,n} + g \frac{d\tilde{\varphi}_{1,n}}{dz} = 0, \text{ при } z = H_1; \quad \frac{d\tilde{\varphi}_{1,n}}{dz} = \frac{d\tilde{\varphi}_{2,n}}{dz}, \text{ при } z = 0; \quad (10)$$

$$\rho_1 \left(P^2 \tilde{\varphi}_{1,n} + g \frac{d\tilde{\varphi}_{1,n}}{dz} \right) = \rho_2 \left(P^2 \tilde{\varphi}_{2,n} + g \frac{d\tilde{\varphi}_{2,n}}{dz} \right), \text{ при } z = 0;$$

$$\frac{d\tilde{\varphi}_{2,n}}{dz} = 0, \text{ при } z = -H_2; \quad \mu_n = \mu_n \frac{1}{R}; \quad n = 1, 2, \dots$$

μ_n – корни следующего трансцендентного уравнения:

$$J'_0(\mu) = J_0(\mu) = 0, \quad (11)$$

J_0 и J_1 – цилиндрические функции Бесселя первого рода.

Правые стороны дифференциальных уравнений получены путем замены бесконечно малых величин эквивалентными малыми величинами:

$$\int_{r_1}^{r_1+\varepsilon} r J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) dr \sim r_1 \varepsilon J_0 \left(\mu_n \frac{r_1}{R} \right);$$

$$\int_{r_2}^{r_2+\varepsilon} r J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) dr \sim r_2 \varepsilon J_0 \left(\mu_n \frac{r_2}{R} \right);$$

В дальнейшем ходе решения приняты следующие замены:

$$\int_{z_0-\varepsilon}^{z_0} sh \lambda_n (H_1 - x) dx \sim sh \lambda_n (H_1 - z_0) \varepsilon;$$

$$\int_{-z_0}^{z_0-\varepsilon} ch \lambda_n (H_2 + x) dx \sim ch \lambda_n (H_2 - z_0) (-\varepsilon);$$

$$\int_{z_0-\varepsilon}^{z_0} ch \lambda_n (H_1 - x) dx \sim ch \lambda_n (H_1 - z_0) \varepsilon;$$

Решена контактная краевая задача (8)–(10) и выполнены обратные интегральные преобразования (8). Значения потенциалов подставлены в зависимости (7). В результате всего этого и предельного перехода $\varepsilon \rightarrow 0$, для уравнения искривленной поверхности раздела слоев получена следующая совокупность расчетных формул:

$$\eta(r, t) = \frac{2}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d_n \Phi_{1,n}(t) - g \lambda_n K_n \Phi_{2,n}(t)}{J_0(\mu_n) \gamma_{1,n} (\omega_{2,n}^2 - \omega_{1,n}^2)} J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \quad (12)$$

$$d_n = \frac{\rho_1}{\rho_2} th \lambda_n H_2 \frac{q_1}{2\pi} J_0 \left(\mu_n \frac{r_1}{R} \right) R_{1,n} - \frac{q_2}{2\pi} J_0 \left(\mu_n \frac{r_2}{R} \right) R_{3,n}; \quad (13)$$

$$k_n = \frac{\rho_1}{\rho_2} th \lambda_n H_2 \frac{q_1}{2\pi} J_0 \left(\mu_n \frac{r_1}{R} \right) R_{2,n} - th \lambda_n H_1 J_0 \left(\mu_n \frac{r_2}{R} \right) R_{3,n} \frac{q_2}{2\pi};$$

$$R_{1,n} = \frac{e^{-\lambda_n z_0} - e^{-\lambda_n (2H_1 - z_0)}}{1 + e^{-2\lambda_n H_1}}; \quad R_{2,n} = \frac{e^{-\lambda_n z_0} + e^{-\lambda_n (2H_1 - z_0)}}{1 + e^{-2\lambda_n H_1}}; \quad R_3 = \frac{e^{-\lambda_n z_0} + e^{-\lambda_n (2H_2 - z_0)}}{1 + e^{-2\lambda_n H_2}};$$

$$\gamma_{1,n} = 1 + \frac{\rho_1}{\rho_2} \operatorname{th} \lambda_n H_1 \operatorname{th} \lambda_n H_2; \quad \gamma_2 = \operatorname{th} \lambda_n H_1 + \operatorname{th} \lambda_n H_2; \quad \gamma_3 = \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \operatorname{th} \lambda_n H_1 \operatorname{th} \lambda_n H_2;$$

$$\omega_{1,n} = \sqrt{g \lambda_n \frac{\gamma_{2,n} - \sqrt{\gamma_{2,n}^2 - 4 \gamma_{1,n} \gamma_{3,n}}}{2 \gamma_{1,n}}}; \quad \omega_2 = \sqrt{g \lambda_n \frac{\gamma_{2,n} + \sqrt{\gamma_{2,n}^2 - 4 \gamma_{1,n} \gamma_{3,n}}}{2 \gamma_{1,n}}};$$

$$\Phi_{1,n}(t) = \begin{cases} \frac{1}{t_0} (\cos \omega_{1,n} t - \cos \omega_{2,n} t), & \text{при } 0 \leq t \leq t_0; \\ \frac{1}{t_0} (\cos \omega_{1,n} t - \cos \omega_{1,n} (t - t_0) - \cos \omega_{2,n} t + \cos \omega_{2,n} (t - t_0)), & \text{при } t > t_0; \end{cases}$$

$$\Phi_{2,n}(t) = \begin{cases} \frac{1}{t_0} \left(\frac{1 - \cos \omega_{1,n} t}{\omega_{1,n}^2} - \frac{1 - \cos \omega_{2,n} t}{\omega_{2,n}^2} \right), & \text{при } 0 \leq t \leq t_0; \\ \frac{1}{t_0} \left(\frac{\cos \omega_{1,n} (t - t_0) - \cos \omega_{2,n} t}{\omega_{1,n}^2} - \frac{\cos \omega_{2,n} (t - t_0) - \cos \omega_{2,n} t}{\omega_{2,n}^2} \right), & \text{при } t \geq t_0 \end{cases}$$

Результаты компьютерных вычислительных экспериментов

Совокупность полученных расчетных формул (11)–(13) для уравнения искривленной поверхности раздела слоев переписана в компьютерно ориентированном виде и выполнены вычислительные эксперименты.

Входным параметрам присваивались следующие числовые значения: $H_1=H_2=2$ м, $Z_0=1,5$ м, $r_1=998$ кг/м³, $r_2=1000$ кг/м³, $r=0$ м, $r_2=0,2$ м, $r_1=1,414 \cdot r_2$ м, $R=500$ м, $q_1=0,01$ м³/с. На рисунке 4 представлены графики зависимости высоты поверхности раздела слоев h от времени, при различных расходах забираемой воды q_2 .

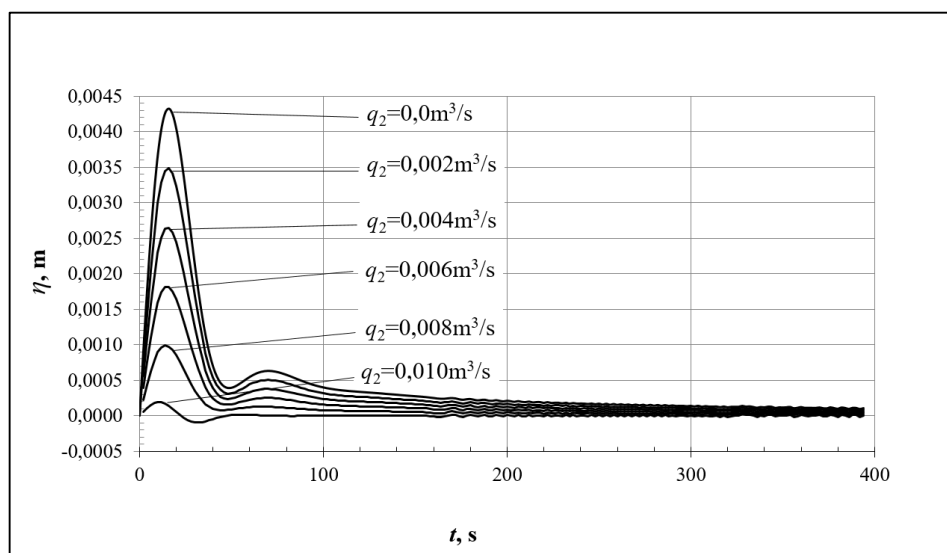


Рис. 4. График зависимости высоты поверхности раздела слоев h от времени, при различных расходах забираемой воды q_2 /

Fig. 4. Graph of the dependence of the height of the interface of the layers h on time, at different rates of water intake q_2

Максимум высоты поверхности раздела слоев h достигается приблизительно через 16 с от начала процесса. При уменьшении расхода забираемой воды q_2 максимум высоты подъема возрастает.

Если рассмотреть зависимость высоты поверхности раздела слоев h от расхода забираемой воды q_2 (рис. 5), то видно, что выравнивание поверхности происходит при расходе $q_2=0,01 \text{ м}^3/\text{с}$.

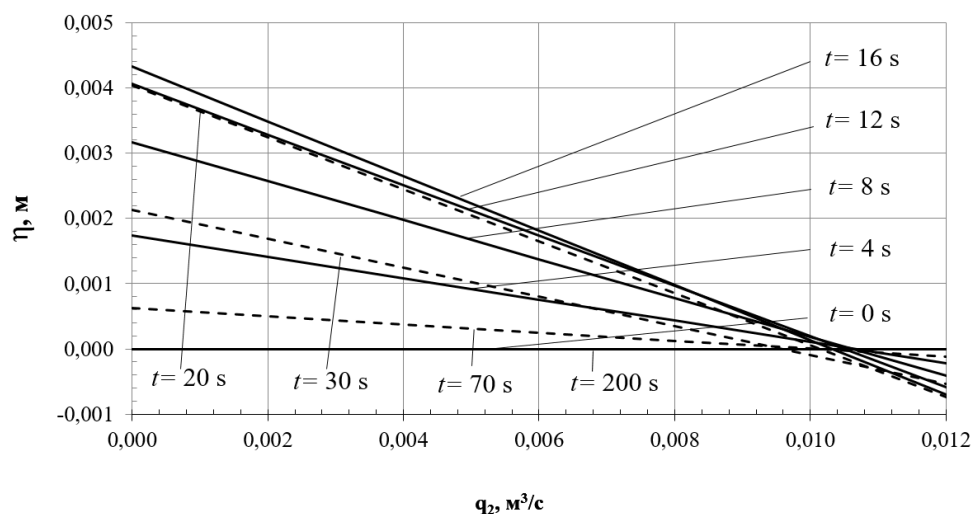


Рис. 5. График зависимости высоты поверхности раздела слоев h от расхода забираемой воды q_2 в различные моменты времени от начала процесса t /

Fig. 5. Graph of the dependence of the height of the interface of the layers h on the intake water flow q_2 at different times from the start of the process t

Максимум высоты подъема растет от плоской поверхности в начале процесса $t=0 \text{ с}$, до 16 с (рис. 5). При закрытой водозаборной трубе $q_2=0$, высота поверхности раздела слоев составляет $h=0,0045 \text{ м}$. При включенной водозаборной трубе и расходе $q_2=0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ поверхность раздела слоев выравнивается и становится возможным забирать воду с большим расходом.

Заключение

На базе теоретической гидромеханики составлена математическая модель нового высокоэффективного селективного способа забора воды из определенного слоя двухслойного стратифицированного водоема – источника водоснабжения. Вода из слоев отводится одновременно двумя соосными (труба в трубе) трубами, опущенными внутрь слоев. Модель представляет контактную начально-краевую задачу математической физики двухслойного движения разноплотностных слоев воды. В результате решения поставленной начально-краевой задачи получена совокупность расчетных формул для уравнения искривленной поверхности раздела слоев. При заборе воды из определенного слоя общеизвестными способами по мере увеличения расхода (скорости) забираемой воды поверхность раздела сильно искривляется и поднимается либо опускается до проема водозаборной трубы, чем нарушается селективный водозаборный процесс. При этом вода из непригодного слоя будет затекать в проем водозаборной трубы. Компьютерными вычислительными экспериментами, выполненными по полученной совокупности формул, доказано, что при заборе воды из определенного слоя водоема разработанным способом двумя соосными трубами можно полностью исключить искривление поверхности раздела слоев. При этом вода из непригодного слоя не сможет прорываться к проему водозаборной трубы. Этот компьютерно-теоретически доказанный гидродинами-

ческий эффект подтверждает высокую эффективность разработанного способа забора воды из стратифицированного водоема.

Литература

1. Аверкиев А.Г., Макаров И.И., Синотин В.И. Бесплотинные водозаборные сооружения. М.: Л.: Энергия, 1969. – 164 с.
2. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидродинамика. М.: Недра, 1993. – 408 с.
3. Белолипецкий В.М., Костюк В.Ю., Шокин Ю.И. Математическое моделирование течений стратифицированной жидкости. Новосибирск: Наука, 1991. – 176 с.
4. Букреев В.И. Способ управления селективным водозабором через отверстие в вертикальной стенке. Прикладная механика и техническая физика. – 2010. – Т. 51. № 3. – С. 49–54.
5. Вазов В.В., Форсайт Дж. Разностные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных. Перевод с английского. М.: Изд. иностранной литературы, 1963. – 483 с.
6. Гавич И.К. Гидро-Геодинамика. М.: Недра, 1988. – 246 с.
7. Гинзбург И.П. Теория сопротивления и теплопередачи. Л.: Изд. Ленинградского университета, 1970. – 378 с.
8. Губанов Р.С. Эксплуатация гидротехнических сооружений и трансформация сооружений, и трансформация прибрежного фаунистического комплекса (Tetrapoda) озера Лысый Лиман. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 2. – С. 103–116. DOI: 10.46698/VNC.2022.30.68.008.
9. Заалишвили В.Б., Музаев И.Д. Один эффективный метод решения начально-краевых задач поперечных колебаний балки с учетом ее внутреннего сопротивления. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 12. № 2. – С. 55–66. DOI: 10.46698/VNC.2023.63.12.005.
10. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Харебов К.С. К вопросу пересчета сейсмической интенсивности шкалы Японского метеорологического агентства (JMA) в макросейсмическую шкалу MSK. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 1. – С. 19–35. DOI: 10.46698/VNC.2024. 82.41.002.
11. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1977. – 830 с.
12. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М.: Высшая школа, 1970. – 710 с.
13. Ламб Г. Гидродинамика. М.: Л.: Гостехиздат, 1947. – 928 с.
14. Маскет М. Физические основы технологии добычи нефти. М.: Л.: Гостехиздат, 1953. – 607 с.
15. Методические указания по технологическим расчетам водоемов-охладителей. / Исполнители А.С. Соколов, И.И. Макаров, В.И. Кравец, З.Р. Филиппова. СПб.: ВНИИГ, 2003. – 116 с.
16. Музаев И.Д. Математическое моделирование селективных водозаборных процессов в двухслойном стратифицированном водоеме. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 3. – С. 29–40. DOI: 10.46698/y4376-5315-2395-x.
17. Музаев И.Д., Созанов В.Г. К теории поверхностных гравитационных волн Коши-Пуассона в узких непризматических водоемах. Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 1995. – № 3. – С. 40–43.
18. Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И. Математическое моделирование способа управления селективным водозаборным процессом в стратифицированном водоеме. // Вычислительные технологии. – 2020. – Т. 25. № 5. – С. 4–16.
19. Справочник по гидравлике. / Под редакцией В.А.Большакова. – Киев: Вища Школа, 1977. – С. 223–225.

20. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. М.: Наука, 1977. – 815 с.
21. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. М.: Недра, 1968. – 299 с.
22. Шокин Ю.И., Рычков А.Д., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б. О численных методах решения задач наката волн на берег. // Вычислительные технологии. – 2015. – Т. 20. № 5. – С. 214–232.
23. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. М.: Колос, 2004. – 480 с.
24. Craya A. Recherches theoriques sur lecoulement de couches superposes de fluides de densites defferents. // La Houille Blanche. – 1949. – Vol. 35. Issue 1. – pp. 44–55. DOI: 10.1051/lhb/1949017.
25. Garabedian P.R. The mathematical theory of three-dimensional cavities and jets. // Bulletin of the American Mathematical Society. – 1956. – Vol. 62. Issue 3. – pp. 219–235.
26. Harleman D.R.F., Stolzenbach K.D. Fluid mechanics of heat disposal from power generation. // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1972. – Vol. 4. – pp. 7–32.
27. Karplus W.J. Water coning before breakthrough an electronic analog treatment. // PetroleumTrans. Society. – 1956. – Vol. 207. Art. No. 240.

References

1. Averkiev A.G., Makarov I.I., Sinotin V.I. Damless water intake structures. Moscow. Leningrad. Energiya. 1969. 164 p. (In Russ.)
2. Basniev K.S., Kochina I.N., Maksimov V.M. Underground hydrodynamics. Moscow. Nedra. 1993. 408 p. (In Russ.)
3. Belolipetskiy V.M., Kostyuk V.Yu., Shokin Yu.I. Mathematical modelling of stratified fluid flows. Novosibirsk. Nauka. 1991. 176 p. (In Russ.)
4. Bukreev V.I. A method for controlling selective water intake through a hole in a vertical wall. Applied Mechanics and Technical Physics. 2010. Vol. 51. No. 3. pp. 49–54. (In Russ.)
5. Vazov V.V., Forsyth J. Difference methods for solving partial differential equations. Translation from English. Moscow. Publishing house Foreign Literature. 1963. 483 p. (In Russ.)
6. Gavich I.K. Hydro-Geodynamics. Moscow. Nedra. 1988. 246 p. (In Russ.)
7. Ginzburg I.P. The theory of resistance and heat transfer. Leningrad. Leningrad University Publishing House. 1970. 378 p. (In Russ.)
8. Gubanov R.S. Operation of Hydraulic Structures and Transformation of Structures, and transformation of the Coastal Faunal Complex (Tetrapoda) of Lake Bald Estuary. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 103–116. DOI: 10.46698/VNC.2022.30.68.008. (In Russ.)
9. Zaalishvili V.B., Muzaev I.D. One effective method for solving initial boundary value problems of transverse vibrations of a beam taking into account its internal resistance. Geology and geophysics of Russian South. 2023. Vol. 12. No. 2. pp. 55–66. DOI: 10.46698/VNC.2023.63.12.005. (In Russ.)
10. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Kharebov K.S. On the issue of converting the seismic intensity of the Japan Meteorological Agency (JMA) scale into the MSK macroseismic scale. Geology and Geophysics of Russian South. 2024. Vol. 14. No. 1. pp. 19–35. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.41.002. (In Russ.)
11. Korn G., Korn T. Mathematical handbook for scientists and engineers. Moscow. Nauka. 1977. 818 p. (In Russ.)
12. Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. Partial differential equation in mathematical physics. Moscow. Vysshaya Shkola. 1970. 710 p. (In Russ.)
13. Lamb G. Hydrodynamics. Moscow. Leningrad. Gostekhizdat. 1947. 929 p. (In Russ.)
14. Masket M. Physical bases of oil production technology. Moscow. Leningrad. Gostekhizdat. 1953. 607 p. (In Russ.)
15. Methodological guidelines for technological calculations of cooling ponds. Eds. A.S. Sokolov, I.I. Makarov, V.I. Kravets, Z.R. Filippova. Saint Petersburg. VNIIG. 2003. 116 p. (In Russ.)

16. Muzaev I.D. Mathematical modeling of selective water intake processes in a two-layer stratified reservoir. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 29–40. DOI: 10.46698/y4376-5315-2395-x. (In Russ.)
17. Muzaev I.D., Sozanov V.G. To the theory of surface gravity waves Cauchy-Poisson in narrow non-prismatic reservoirs. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences*. 1995. No. 3. pp. 40–43. (In Russ.)
18. Muzaev I.D., Kharebov K.S., Muzaev N.I. Mathematical modelling of the method for controlling selective water intake process in a stratified reservoir. *Computational Technologies*. 2020. Vol. 25. No. 5. pp. 4–16. (In Russ.)
19. Reference book on hydraulics. Ed. V.A. Bolshakov. Kiev. Vyshcha Shkola. 1977. pp. 223–225. (In Russ.)
20. Sretenski L.N. Theory of wave motions of a fluid. Moscow. Nauka. 1977. 815 p. (In Russ.)
21. Charny I.A. Underground hydro-gas dynamics. Moscow. Nedra. 1968. 299 p. (In Russ.)
22. Shokin Yu.I., Rychkov A.D., Khakimzyanov G.S., Chubarov L.B. On numerical methods for solving problems of wave runup on the shore. *Computational Technologies*. 2015. Vol. 20. No. 5. pp. 214–232. (In Russ.)
23. Shterenlicht D.V. Hydraulics. Moscow. Kolos. 2004. 480 p. (In Russ.)
24. Craya A. Recherches theoriques sur lecoulement de couches superposes de fluides de densites defferents. *La Houille Blanche*. 1949. Vol. 35. Issue 1. pp. 44–55. DOI: 10.1051/lhb/1949017.
25. Garabedian P.R. The mathematical theory of three-dimensional cavities and jets. *Bulletin of the American Mathematical Society*. 1956. Vol. 62. Issue 3. pp. 219–235.
26. Harleman D.R.F., Stolzenbach K.D. Fluid mechanics of heat disposal from power generation. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1972. Vol. 4. pp. 7–32.
27. Karplus W.J. Water coning before breakthrough an electronic analog treatment. *PetroleumTrans. Society*. 1956. Vol. 207. Art. No. 240.

УДК 523.3:551.2

DOI: 10.46698/VNC.2025.38.32.001

Оригинальная статья

Короткопериодные компоненты движения полюсов Земли и современная геодинамика

А.В. Мясников¹, В.В. Стогний²

¹ Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ,
Россия, 119234, г. Москва, Университетский пр., 13,
e-mail: andrey0405@mail.ru;

² Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а,
e-mail: stogny_vv@mail.ru

Статья поступила: 19.05.2025, доработана: 04.06.2025, принята к публикации: 06.06.2025

Резюме: Актуальность работы. Изучение короткопериодных компонент движения полюсов Земли и обоснование их возможной связи с геодинамическими процессами представляет собой актуальную проблему, определяющую подход к разработке моделей формирования полей напряженно-деформированного состояния земной коры сейсмоактивных регионов и характера их сейсмической активности. **Цель работы** – детальное изучение высокочастотных компонент движения полюсов Земли и обоснование их возможной связи с геодинамическими процессами. **Методы исследования.** Проведена цифровая фильтрация и спектральная обработка каталогов МСВЗ движения Северного полюса Земли с 1962 года (данные бюллетеня EOP14C04) и с 1900 года (данные бюллетеня EOP14C01) по 2024 год и анализ полученных материалов с выделением короткопериодных компонент движения Северного полюса Земли. **Результаты работы.** В спектрах вариаций движения Северного полюса Земли выделены короткопериодные компоненты. Рассмотрены возможные причины основных мод и обоснована их единая природа. Показано, что уровень высокочастотного «шума» в интервале частот, соответствующем периодам 100–30 суток, пропорционален величине отклонения полюса и сильно модулирован составляющей 6.3 года как огибающей высокочастотного диапазона исходного ряда с постоянным уменьшением его амплитуды за период с 1962 года (данные бюллетеня EOP14C04) до 2023 года и последующим ростом уровня высокочастотного «шума». Полученные материалы позволяют ставить в качестве проблемы исследование связи сейсмичности и ротационного режима Земли на примере отдельных сейсмоопасных регионов.

Ключевые слова: отклонение полюса, параметры вращения Земли, эллиптическая волна, деклинационная волна, чандлеровский период, годовой период, нутация ядра, спектральный анализ, геодинамика, землетрясение.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова и по госзаданию Геофизического института ВНЦ РАН, код: FMSM-2025-0025.

Для цитирования: Мясников А.В., Стогний В.В. Короткопериодные компоненты движения полюсов Земли и современная геодинамика. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 33–49. DOI: 10.46698/VNC.2025.38.32.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.38.32.001

Original paper

Short-period components of the Earth's polar motion and modern geodynamics

A.V. Myasnikov¹, V.V. Stogny²

¹Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University,
13 Universitetsky Pr., Moscow 119234, Russian Federation,
e-mail: andrey0405@mail.ru;

²Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation,
e-mail: stogny_vv@mail.ru

Received: 19.05.2025, revised: 04.06.2025, accepted: 06.06.2025

Abstract: Relevance. The study of short-period components of the Earth's polar motion and the substantiation of their possible connection with geodynamic processes is a pressing problem that determines the approach to the development of models for the formation of stress-strain state fields in the Earth's crust of seismically active regions and the nature of their seismic activity. **Aim.** A detailed study of high-frequency components of the Earth's pole motion and substantiation of their possible connection with geodynamic processes. **Research methods.** Digital filtering and spectral processing of the IERS catalogues of the Earth's North Pole motion from 1962 (EOP14C04 bulletin data) and from 1900 (EOP14C01 bulletin data) to 2024 were carried out, and the obtained materials were analyzed, identifying short-period components of the Earth's North Pole motion. **Results.** Short-period components are identified in the spectra of variations in the Earth's North Pole motion. Possible causes of the main modes are considered and their unified nature is substantiated. It is shown that the level of high-frequency "noise" in the frequency range corresponding to periods of 100-30 days is proportional to the magnitude of the pole deviation and is strongly modulated by the 6.3-year component as an envelope of the high-frequency range of the original series with a constant decrease in its amplitude over the period from 1962 (EOP14C04 bulletin data) to 2023 and a subsequent increase in the level of high-frequency "noise". The obtained materials allow us to pose as a problem the study of the relationship between seismicity and the rotational regime of the Earth using the example of individual seismically hazardous regions.

Keywords: polar deviation, Earth rotation parameters, elliptical wave, declination wave, Chandler period, annual period, core nutation, spectral analysis, geodynamics, earthquake.

Acknowledgment: The study was carried out within the framework of the state assignment of the Lomonosov Moscow State University and according to the state assignment of the Geophysical Institute of the VSC RAS, code: FMSM-2025-0025.

For citation: Myasnikov A.V., Stogny V.V. Short-period components of the Earth's polar motion and modern geodynamics. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 33-49. DOI: 10.46698/VNC.2025.38.32.001

Введение

Космические факторы определяли геологические процессы развития Земли как планеты на всем протяжении ее эволюции [Баренбаум, 2002; Куликова и др., 2005]. Наиболее длиннопериодными из доказанных к настоящему времени являются геологические процессы, обусловленные движением Солнечной системы вокруг ядра галактики, Галактический год, длительность которого оценивается в 180–200 млн

лет, обоснованные И.М. Суховым [Научное наследие ..., 1994].

Современные геодинамические процессы, определяющие сейсмическую активность Земли, также связаны с космическими факторами, взаимосвязь которых начинает изучаться [Алиев и др., 2023]. Среди короткопериодных вариаций, определяющих современную геодинамику, обычно рассматривают Чандлеровские колебания (длительность ~430 суток). Вместе с тем, короткопериодные процессы, вызывающие изменение ротационного режима Земли и, соответственно, отражающиеся в современной геодинамике, очень разнообразны и по причинам возникновения, и по их следствиям, что являлось основной целью проведенных исследований. Для горных регионов, где наиболее четко прослеживается связь геодинамических процессов с геоэкологической нагрузкой [Бурдзиева и др., 2024], такие исследования наиболее актуальны.

Обзор и обоснование проблемы исследований

Хорошо известен факт, что на фоне векового дрейфа движения полюса существуют две основные периодические компоненты, вызванные разными причинами: 1) годовая компонента движения полюса (ГДП); 2) Чандлеровская компонента движения полюса (ЧДП) с периодом 414–440 суток. Происхождение годовой составляющей обусловлено в основном перемещением масс в атмосфере и в океанах. Сезонное перемещение воздушных (в первую очередь) и водных объемов обуславливает масштабное перераспределение масс на поверхности Земли с периодом равным тропическому году и природа ГДП понятна. Вторая компонента движения полюса, ЧДП, наоборот, вызывает многочисленные дискуссии и вопросы и, более того, невыясненной остается сама природа ее происхождения. Так, петербургский академик Леонард Эйлер в 1765 г., исследуя вращение твердого тела, теоретически вывел, что если оно отличается от идеального шара и его главные моменты инерции не равны между собой, то ось вращения будет перемещаться внутри тела, описывая узкий конус с соответствующим периодом вокруг оси наибольшего момента инерции.

Для фигуры Земли с определенными параметрами этот период составил 305 суток. Действительно, с самого начала широтных исследований движение полюса по поверхности объясняли теорией свободной нутации [Куликов, 1962]. Исходя из этого, было оценено значение динамического сжатия Земли $H=1/305,51$, которое оказалось отличным от величины $H=1/427$, определенной благодаря наблюдениям вынужденной нутации Земли под действием Луны и Солнца [Woolard, 1953]. Для объяснения различия оценок С.Ньюкомб [Newcomb, 1892] предложил рассматривать период $T=305$ суток как период свободной нутации абсолютно твердой Земли, а период $T=430$ суток, выявленных американским астрономом С.Чандлером (Seth Carlo Chandler) в 1891 г. и получивших название чандлеровских – как период свободной нутации деформируемой Земли. В работе [Крамер, Молоденский, 1961] было показано, что при изменении параметров твердости исследуемого тела меняется и его динамическое сжатие, то есть, различие между двумя значениями сжатия связано с процессом, при котором меняются свойства изучаемого объекта.

Перемещения оси вращения в структурно-неоднородном теле могут происходить не только при свободной нутации, но и под действием внешней силы. В качестве начальной модели достаточно рассмотреть общую структурную схему строения Земли, согласно которой Земля представляет собой эллипсоид вращения, со-

стоящий из твердой (упругой) оболочки толщиной 2900 км (земная кора и мантия) и массой $4.080 \cdot 10^{24}$ кг. Ядро Земли при радиусе 3480 км имеет массу $1.883 \cdot 10^{24}$ кг, в центре – твердое ядро радиуса 1217 км [Стогний, 2023]. По современным представлениям [Литасов, Шацкий, 2016], внешнее жидкое ядро имеет однородную структуру и дефицит плотности около 10% (по сравнению с плотностью Fe), а внутреннее твердое ядро имеет сильно неоднородную структуру и дефицит плотности около 5%. По геомагнитным наблюдениям отмечается слабая рассогласованность вращения структур, при которой направление оси вращения оболочки и ядра различается на величину порядка 10^{-5} рад. В результате решения обратной задачи магнитометрии установлено [Кочнев, 2023], что движение положительно слабо заряженной жидкости ядра, создаваемое вращением Земли и тормозящими гравитационными силами Луны и Солнца, обуславливает ток, генерирующий ее магнитное поле. Изменения в ядре, приводящие к изменениям положения оси вращения Земли, сопровождаются скачками земного магнитного поля [Вольвач и др., 2022].

В последующих моделях нутации и дрейфа движения полюса Земли необходимо учитывать также симметрию геодинамических систем Земли и, в частности, антисимметрию (антиподальность) рельефа и структуры Земли. Понятие антиподальности, введенное в 1960 г. Г.Н. Каттерфельдом и проявляющееся, прежде всего, в антиподальности Северного и Южного полушарий Земли, выражается в континентальности ее Северного и океаничности Южного полушарий [Павленкин, Межевов, 2009]. Сферически-несимметричное строение характерно не только для Земли, но и для других планет Солнечной системы, Венеры, Марса и Луны (в системе двойной планеты Земля-Луна) [Тараканов, 1999].

Механическая связь сфероида со структурой всей Земли характеризуется некоторым коэффициентом k , через который определяется собственная частота колебаний и через который можно пересчитать модуль внешней силы в перемещения сфероида. Смещения ядра повлекут за собой изменения положения центра масс Земли относительно внешней оболочки. Мгновенная ось вращения спроектирует на поверхность эти изменения, которые будут восприняты как движения полюса. Происходящие в то же время наклоны оболочки ведут к тому, что траектория движения центра масс воспроизводится на поверхности в переменном масштабе. В соответствии с этим изменимость широт следует рассматривать не как проявление свободной нутации, а как процесс, обусловленный вынужденными движениями внутреннего ядра, происходящими на фоне вынужденной нутации под действием приливных сил Луны, Солнца и планет.

По нашему мнению, ключом к изучению причин нутации Земли является детальное изучение высокочастотных компонент движения полюсов Земли и их связи с геодинамическими процессами.

Методика и результаты исследований

В статье приведены все ссылки на используемые данные (бюллетени МСВЗ ЕОРС01 и ЕОР14С04), процедуры цифровой фильтрации и приемы обработки полученных сигналов на базе этих данных.

Спектральный анализ. В работе использованы данные бюллетеня ЕОР14С04 Международная Служба Вращения Земли (МСВЗ) отклонения Северного полюса в прямоугольных координатах X и Y , относительно Международного Условного Начала (МУН) с 1962 года по настоящее время. Мгновенный полюс перемещается по

земной поверхности вокруг среднего полюса в направлении вращения Земли, т.е. против часовой стрелки. По этим данным был построен сигнал абсолютного отклонения полюса R , по которому проводилась дальнейшая обработка.

Результат спектрального анализа данного сигнала абсолютного отклонения полюса R в частотном диапазоне соответствующий периодам 10–10000 суток показан на рисунке 1а (в логарифмическом масштабе). Хорошо видно составляющие ГДП (период 365 суток) и ЧДП (средний период 433 суток за рассматриваемый интервал) и кратные им моды: 1 (период 217 суток), 2 (198 суток), 3 (144 суток), 4 (136 суток). Отметим, что, строго говоря, кратными являются только 1 и 3 моды относительно Чандлеровской составляющей, а моды 2 и 4 являются боковыми относительно 1 и 3 соответственно, и указывают на модуляцию этих мод [Отнес, Энноксон, 1982] с периодом 6.1–6.2 лет.

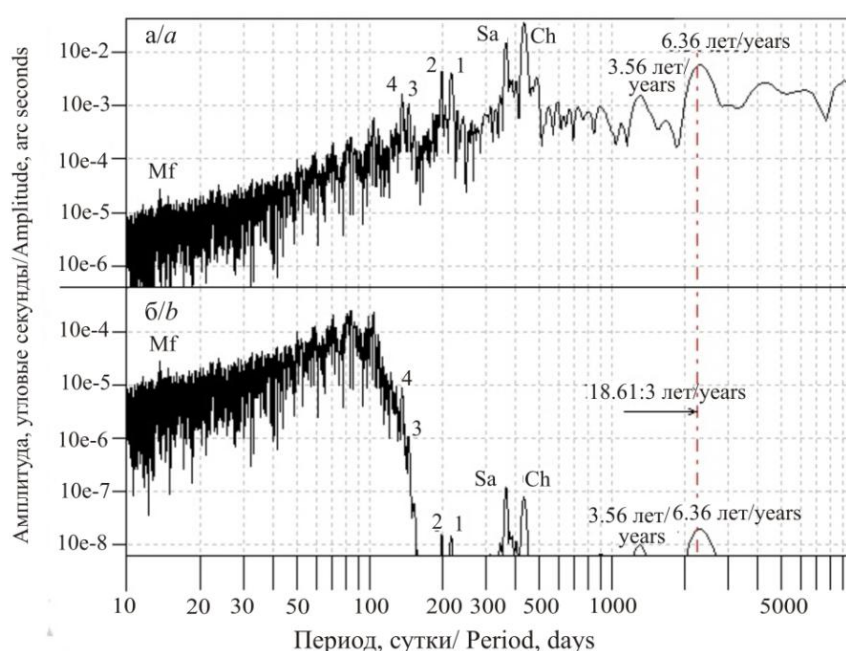


Рис. 1. Спектр отклонения Северного полюса в диапазоне 10–10000 суток: а – спектр абсолютного отклонения, б – спектр отклонения полюса с подавленными низкими частотами соответствующими периодам более 100 суток. Ch – период Чандлера (430 суток); Sa – годовой период; 1, 3 – кратные моды относительно периода Ch в порядке увеличения частоты; 2, 4 – боковые моды относительно 1, 3 соответственно; Mf – лунная приливная волна (13.66 суток). Вертикальная штрихпунктирная линия соответствует одной трети периода (18.61 лет /3) движения лунных узлов 6.21 года /

Fig. 1. Spectrum of the North Pole deviation in the range of 10–10,000 days: a – spectrum of absolute deviation, b – spectrum of the pole deviation with suppressed low frequencies corresponding to periods longer than 100 days. Ch – Chandler period (430 days); Sa – annual period; 1, 3 – multiple modes relative to the Ch period in order of increasing frequency; 2, 4 – lateral modes relative to 1, 3, respectively; Mf – lunar tidal wave (13.66 days). The vertical dash-dotted line corresponds to one third of the period (18.61 years /3) of the lunar node motion 6.21 years

Выполненный спектральный анализ дал возможность также выделить в сигнале отклонения полюса лунную приливную волну Mf (период 13.66 суток, деклинационная волна). Отношение «сигнал/шум» этой моды не превышает 2 единиц. Но, вместе с тем, приливную волну Mm (период 27.55 суток, эллиптическая волна) в результате спектрального анализа не удалось выделить на фоне шума.

Вариация амплитуды лунных мод Mm и Mf и амплитуды огибающей в узком частотном диапазоне 100–30 суток. На первом этапе работы была поставлена задача: определить вариацию параметров (амплитуды и фазы) приливной волны Mf , которая однозначно была выделена в ходе предварительного спектрального анализа, и параметры моды с периодом волны Mm (сама волна не обнаружена). Вариация параметров моды определенного периода производилась с помощью кросс-спектрального анализа по следующей методике.

В качестве опорной лунной приливной волны генерировалась обычная гармоника выбранного приливного периода с нулевой фазой и единичной амплитудой. Кросс-спектральный анализ совместной обработки сигнала R и сгенерированной гармоника позволил определить амплитуду сигнала и его фазу относительно этого опорного сигнала на определенной частоте. Выбирая, таким образом, ширину окна и длину шага, становится возможным проследить вариацию этих параметров на всем интервале наблюдений. В данной работе ширина окна составила 200 суток, шаг 5 суток. Следуя этой методике, были выделены вариации параметров мод с периодами, соответствующими лунным волнам Mf и Mm начиная с 1962 года. Было выяснено, что наиболее полную и дополнительную информацию несет не вариация параметров отдельных мод (Mf , Mm), а огибающая уровня сигнала, полученная в результате полосовой фильтрации в частотном диапазоне соответствующем периодам 100–30 суток.

Процедура цифровой фильтрации являлась основной в данной работе, приведем краткое описание. Полосовой фильтр строился в виде нерекурсивного импульсного фильтра с конечной областью отклика (ИКО) [Отнес, Эноксон, 1982]. Это вид симметричных фильтров, которые не имеют задержки фазы сигнала на выходе (нулевой фазовый угол). Параметры фильтра были подобраны в соответствии с методикой, разработанной в работе [Ormsby, 1961]. Диапазон области отклика фильтра 1000 суток, что обеспечивает высокие характеристики процедуры фильтрации. На рисунке 1б показан результат работы цифрового фильтра в режиме высокочастотной фильтрации с частотой среза соответствующей 100 суткам, где амплитуды ГДП и ЧДП исходного сигнала подавлены более чем в 10^5 раз.

На рисунке 2 приведен спектр мощности сигнала отклонения Северного полюса в линейном масштабе в диапазоне 10–20 суток. По результатам анализа были выделены еще две моды с известными периодами. Это мода Sz (14.76 суток, сизигия или полупериод синодического месяца) и мода Sd (13.60 суток, полупериод драконического месяца). В энергетическом смысле влияние Луны на этих частотах на движение полюса пренебрежимо мало.

На рисунке 3 показано движение Северного полюса за период 1962–2024 гг., на рисунке 3а – исходный ряд абсолютного движения по данным бюллетеня EOP14C04 MCB3, а на рисунке 3б серым цветом показан результат фильтрации исходного сигнала, черным цветом показана его огибающая, которая и формирует сигнал Rf (см. табл. 1). Важным моментом является вопрос о природе этого «шума», не есть ли он инструментальная погрешность определения координат (X , Y) движения полюса. На рисунке 3д показана огибающая, полученная при фильтрации исходного сигнала R высокочастотным фильтром с частотой среза соответствующей периоду 30 суток, формирует сигнал $Rf2$ (см. табл. 1). Форма сигнала $Rf2$ как огибающая уровня «шума» кардинально изменилась примерно в 1980, затем в 1983 годах.

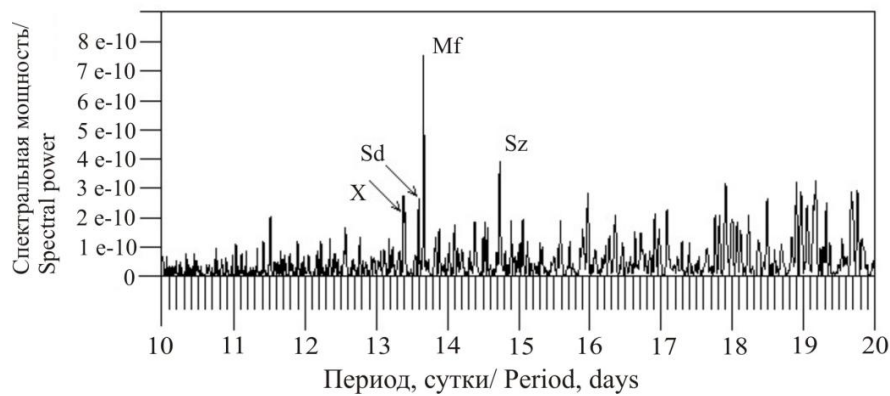


Рис. 2. Спектр мощности сигнала отклонения Северного полюса в диапазоне 10–20 суток. Обозначения выделенных мод: Mf – период лунной деклинационной приливной волны, Sz – период сизигий (14.76 суток) или полупериод синодического месяца, Sd – полупериод (13.60 суток) драконического месяца, X – неотожествленный период 13.38 суток /

Fig. 2. Power spectrum of the North Pole deviation signal in the range of 10–20 days. Designations of the selected modes: Mf – period of the lunar declination tidal wave, Sz – period of syzygies (14.76 days) or half-period of the synodic month, Sd – half-period (13.60 days) of the draconic month, X – unidentified period of 13.38 days

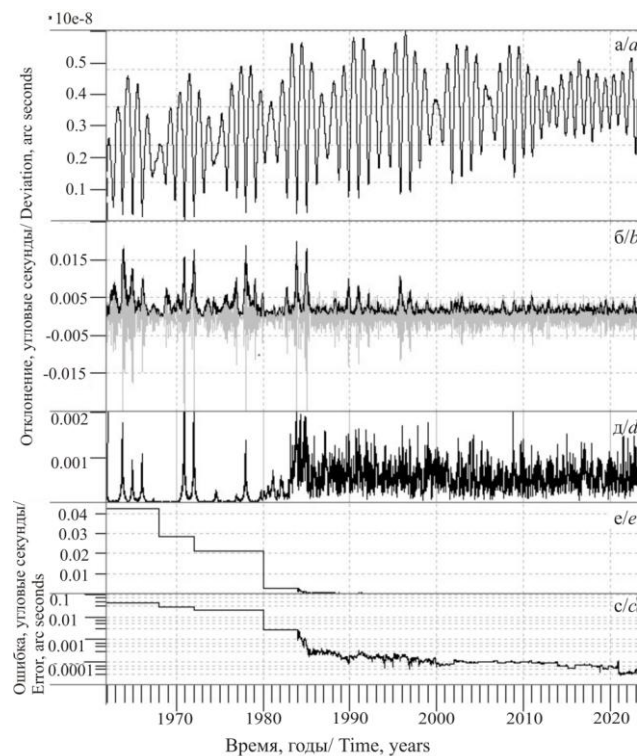


Рис. 3. Движение Северного полюса за период 1962–2024 гг.: а – исходный ряд абсолютного движения по данным бюллетеня EOP14C04 МСВЗ; б – серым цветом показан высокочастотный «шум» исходного ряда данных с частотой среза соответствующей периоду 100 суток, черным цветом показана огибающая этой высокочастотной компоненты; д – огибающая высокочастотного «шума» исходного ряда данных с частотой среза соответствующей периоду 30 суток; е, с – ошибка измерения ДПЗ в линейном и логарифмическом масштабах соответственно /

Fig. 3. The North Pole motion for the period 1962–2024: a – the original series of absolute motion based on the EOP14C04 IERS bulletin; b – the high-frequency “noise” of the original data series with a cutoff frequency corresponding to a period of 100 days is shown in gray, the envelope of this high-frequency component is shown in black; d – the envelope of the high-frequency “noise” of the original data series with a cutoff frequency corresponding to a period of 30 days; e, c – the error in measuring the DPD on linear and logarithmic scales, respectively

В таблице 1 вводятся обозначения и описания четырех сигналов. Во временной области сигнал R изображен на рисунке 3а. В первом приближении этот сигнал определяется двумя гармоническими процессами, ГДП и ЧДП, на долю которых приходится 93% всей энергии сигнала, на фоне векового дрейфа полюса [Woolard, 1953].

Таблица 1 / Table 1

Описание сигналов полученных в процессе обработки /
Description of signals received during processing

№/ No.	Сигнал/ Signal	Описание / Description
1	R	Исходный сигнал, полученный как абсолютное отклонение полюса по ряду координат X,Y движения полюса по данным бюллетеня EOP14C04 (1962–2024 годы) MCB3 согласно $R=(X^2+Y^2)^{0.5}$. См. рис. 3а / The original signal obtained as the absolute deviation of the pole along a series of X,Y coordinates of the pole's motion according to the EOP14C04 bulletin (1962–2024) of the IERS according to $R=(X^2+Y^2)^{0.5}$. See Fig. 3a
2	Rf	Огибающая уровня «шума» сигнала R в полосе частот соответствующих периоду 30–100 суток. См. рис. 3б / The envelope of the “noise” level of the R signal in the frequency band corresponding to the period of 30–100 days. See Fig. 3b
3	Rf2	Огибающая уровня «шума» сигнала R в высокочастотной области с частотой среза соответствующей периоду 30 суток. См. рис. 3д / The envelope of the “noise” level of the R signal in the high-frequency region with a cutoff frequency corresponding to a period of 30 days. See Fig. 3d
4	R2	Исходный сигнал. Абсолютное отклонение полюса $R2=(X^2+Y^2)^{0.5}$ по данным бюллетеня EOP14C01 (1900–2024 годы) MCB3 / Original signal. Absolute pole deviation $R2=(X^2+Y^2)^{0.5}$ according to the EOP14C01 bulletin (1900–2024) of the International Society of Earth and Earth Studies

Данные бюллетеня EOP14C04 MCB3 позволяют проследить увеличение точности (или уменьшение ошибки) измерения отклонения полюса X и Y , в первую очередь как результат технического прогресса. На рисунке 3е в логарифмическом масштабе показано как уменьшалась ошибка определения координат полюса, а на рисунке 3с показан график эволюции ошибки в линейном масштабе. Аналогичный результат отмечен в [Wang et al., 2016]. Действительно, в 80-е годы наблюдения с помощью оптических телескопов стали дополняться новыми методами измерений: с помощью радиоинтерферометров со сверхдлинными базами (РДСБ), лазерной локации спутников (ЛЛС) и Луны (ЛЛЛ), системы глобального позиционирования (GPS) и т.д. В 1980-х годах произошло значительное увеличение точности также благодаря применению новых инструментов определения широты станции наблюдения.

Огибающая сигнала $Rf2$ прекрасно иллюстрирует этот технический прогресс (рис. 3д). Так, уровень высокочастотного «шума» $Rf2$, собственно говоря, только появляется на записи после 80-х годов, и не уменьшился с ростом точности измерения координат полюса. То есть высокочастотный «шум» является не стохастическим шумом и не инструментальной ошибкой, а реальным сигналом, определяющим высокочастотные вариации координат полюса. Этот вывод мы можем распространить и на сигнал Rf . С другой стороны, на форму последнего практически не повлияло увеличение точности наблюдений. Более того, вариация уровня Rf имеет тенденцию к резкому увеличению, начиная с 2024 года.

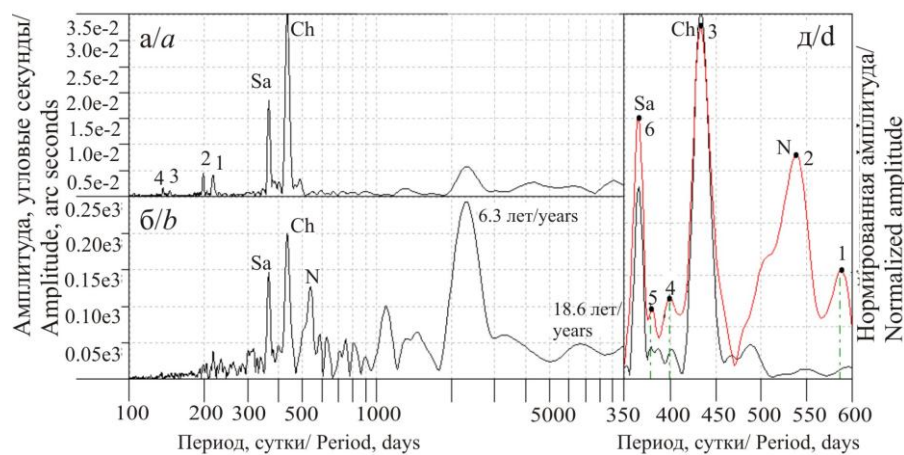


Рис. 4. Результаты спектрального анализа движения Северного полюса в диапазоне периодов 10–1000 суток: а – спектр амплитуды исходного сигнала; б – спектр амплитуды огибающей высокочастотного «шума»; в – совмещение спектров с нормированной амплитудой в диапазоне периодов 350–600 суток (линейный масштаб, черная линия – спектр исходного сигнала, красная линия – спектр огибающей уровня высокочастотного «шума»). Sa – годовая компонента ДПЗ, Ch – ЧДП, N – «новая» мода, 6.3 и 18.6 – моды с периодами 6.3 и 18.6 лет соответственно, 1, 4, 5 – прочие моды. Точки 1–6 показывают программно определенные максимумы спектральных линий. Штрихпунктирные вертикальные линии показывают период сближения Земли с Венерой (588.78 суток – максимум спектральной моды, точка 1 – 584 суток), точка 4 – с Юпитером (398.79–399), точка 5 – с Сатурном (379.15 – 378) /

Fig. 4. Results of spectral analysis of the North Pole motion in the period range of 10–1000 days: a – spectrum of the original signal amplitude; b – spectrum of the high-frequency “noise” envelope amplitude; c – superposition of spectra with normalized amplitude in the period range of 350–600 days (linear scale, black line – spectrum of the original signal, red line – spectrum of the high-frequency “noise” envelope). Sa – annual component of the DPD, Ch – NDP, N – “new” mode, 6.3 and 18.6 – modes with periods of 6.3 and 18.6 years, respectively, 1, 4, 5 – other modes. Points 1–6 show the software-defined maxima of the spectral lines. The dashed vertical lines show the period of the Earth’s approach to Venus (588.78 days – maximum of the spectral mode, point 1 – 584 days), point 4 – with Jupiter (398.79–399), point 5 – with Saturn (379.15 – 378) /

Спектральный анализ вариации амплитуды сигнала R_f . На рисунке 4 приведены результаты спектрального анализа движения Северного полюса в диапазоне периодов 10–1000 суток (рис. 4а,б в логарифмическом масштабе) и в диапазоне периодов 350–600 суток (рис. 4д в линейном масштабе). Анализ спектра вариаций сигнала R_f позволил обосновать присутствие мод, совпадающих с периодами основных составляющих отклонения полюса: годовой период Sa и чандлеровский период движения полюса Ch. На рисунке 4д в спектре огибающей R_f появилась новая мода (обозначена символом «N») период которой составляет $T_N=538$ суток. Значение этого периода соответствует второй боковой полосе при условии модуляции амплитуды чандлеровской моды циклическим процессом с периодом T равным $1/3$ периода движения лунных узлов (18.61 года), что составляет 6.2 года. Наиболее убедительным будет результат, если показать это по отношению к другой боковой полосе, а именно годовой составляющей ГДП ($T_{Sa}=365.24$ суток), период которой стабилен. Действительно, $1/(T/2)=1/T_N-1/T_{Sa}$, откуда следует, что $T=6.21$ года. На рисунке 4а схематично показано расположение боковых полос при амплитудной модуляции с периодом T основной центральной моды на частотной оси (порядок расположения мод зеркально отобразится). В этом случае две полосы с соответствующими частотами ($1/365$ и $1/538$) расположились бы симметрично относительно моды Чандлера ($1/433$).

Обсуждение результатов

Земля это сложная механическая система взаимодействующих между собой различных геосфер, в которой ярко проявляются ее нелинейные свойства. Отклонение полюса Земли сопровождается по результатам данного исследования высокочастотным «шумом», но не как стохастическим процессом, а вполне определенным сигналом, уровень которого, в первом приближении, пропорционален величине этого отклонения. В результате обработки и анализа был выбран частотный интервал, соответствующий периодам 100–30 суток, в котором формировался сигнал R_f . Во-первых, в этом интервале, на форме огибающей «шума», не отразились те изменения в точности измерений координат движения полюса, которые произошли с начала 80-х годов (см. рис. 3). И самое главное, этот интервал имеет некую самоподобную структуру относительно исходного сигнала. Спектр полученной огибающей «шума» содержит уже 4 основных моды. Это годовая и чандлеровская составляющие, мода 6.3 года, энергетический уровень которой кратно вырос, и новая мода с периодом 538.14 суток. Эта мода отсутствует в спектре исходного сигнала R , и обнаруживается в спектре сигнала R_f , где занимает вполне определенное положение в частотной области. В частотном диапазоне она стоит ровно на том месте, где должна находиться боковая полоса при условии амплитудной модуляции амплитуды чандлеровской составляющей одну треть периода движения лунных узлов (18.612 лет) и на частотном расстоянии от годовой компоненты движения полюса ГДП равным соответствующим двум периодам по 6.2 года. В данном случае основной вывод заключается в следующем. Существует одна осциллирующая система с чандлеровским периодом колебаний. Амплитуда колебаний этого осциллятора модулируется циклическим процессом (движением Луны) с периодом одной трети периода лунных узлов. В результате в спектре возникают две боковые моды относительно чандлеровской компоненты.

В случае точного значения периода модуляции (6.21 года), левая боковая полоса (в соответствии с рис. 4) должна иметь период в 363.6 суток (период Чандлера принимаем 433 суток), который близок к годовому периоду Земли. Следовательно, такое обращение (с периодом 363.6 суток) должно синхронизоваться с обращением Земли, что и приводит к годовой компоненте с периодом 365 суток. Динамическая система приходит к своему устойчивому состоянию, соответствующему минимуму потенциальной энергии. В этом случае, сезонному движению масс на поверхности Земли отводится роль триггера, но не определяющего процесса годового движения полюса. Заметим, что этот вывод не распространяется на годовую составляющую вариации скорости вращения Земли.

Особое значение в этой системе имеет наличие ядра Земли: во-первых, оси вращения мантии и ядра слегка смещены и возможно существует вращение анизотропного ядра относительно мантии со скоростью порядка 0.5–1.0 градус/год, во-вторых, нельзя исключить поступательных колебаний внутреннего ядра за счет его отрицательной плавучести.

Обратимся к кратным модам 1 и 3 чандлеровской компоненты (433 суток) (см. рис. 1), точные значения (вычислены программно как точка максимума соответствующего пика в частотной области спектра) которых равны 217.1322 и 144.8641 суток соответственно. Кратные моды по отношению к годовой компоненте движения полюса в спектре отсутствуют. Моды 2 и 4, период которых 198.21 и

136.0 суток, не кратные периоду годовой компоненты (365.24 суток). Но если рассматривать их как боковые полосы по отношению к модам 1 и 3, то они образуют модуляцию с периодом 6.2 и 6.1 года соответственно. Здесь боковые моды не «скачываются» к неким устойчивым значениям периода, как в случае с годовой компонентой, и модуляция точно совпадает с 1/3 периода лунных узлов.

Годовая и Чандлеровская компоненты являются связанными колебаниями одной природы [Мясников, 2024], и возбуждение одной приводит к подавлению другой. Подобные параметрические резонансы очень часто встречаются в Солнечной системе. В данном случае мы имеем резонанс как отношение простых чисел 1:3. Причем в спектре огибающей «шума» (сигнал Rf) в явном виде присутствует и сама мода с периодом 18.61 года (см. рис. 4б). Период лунных узлов, при определенных предварительных преобразованиях был обнаружен и в исходных данных движения полюса (X , Y) в работе [Перепелкин и др., 2022]. На рисунке 4д, где приведены совмещенные нормированные амплитудные спектры исходного сигнала R и сигнала Rf в частотном диапазоне соответствующем периодам 350–600 суток, жирные точки 1–5 показывают максимальные значения всех мод, периоды которых определены (вычислены программно) и показаны в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Моды Чандлера, связанные с периодами сближения Земли с Венерой, Юпитером и Сатурном / Chandler modes associated with periods of approach of the Earth to Venus, Jupiter and Saturn

Точки /Points Название /Name	1 Венера/ Venus	2 Новая Мода/ New Mode	3 Мода Чандлера/ Chandler's Mode	4 Юпитер/ Jupiter	5 Сатурн/ Saturn	6 Годовая Компонента/ Annual Component
Период (сутки) Вычисленный / Period (day) calculated	588.78	538.14	412–440 (см. рис.5)/ (see Fig.5)	398.78	378.55	365.31
Период (сутки) Известный / Period (day) known	584	—	433.31	399	378	365.24

Кроме периодов движения полюса (в табл. 2 выделены жирным шрифтом) появились еще 3 моды (рис. 4д), которые достаточно точно совпадают с периодами сближения Земли с Венерой, Юпитером и Сатурном. Период сближения с Марсом составляет 780 суток. На спектре рисунка 4б отмечена мода 804 суток, что может приблизительно соответствовать периоду сближения с Марсом.

Основной результат, который обсуждался в предыдущем разделе, связан с тем обстоятельством, что колебательное движение полюса определяется одной осциллирующей системой с переменными параметрами, что, в свою очередь, обуславливает единую природу годовой и чандлеровой составляющих. Подобные идеи, как системы связанных осцилляторов, уже рассматривались в [Kurbasova et al., 2003]. Приведем еще один результат, который является следствием сделанных выше выводов.

Воспользуемся, в этот раз, данными бюллетеня ЕОР14С01 Международная Служба Вращения Земли (МСВЗ) отклонения Северного полюса начиная с 1900 года по настоящее время. Сформируем сигнал $R2$ подобным выше описанным образом (Формирование сигнала R , см. табл. 1). С помощью сконструированного импульсного полосового фильтра (описание процедуры фильтрации см. выше) выделим три составляющих: годовая компонента, чандлеровская компонента и мода с периодом 6.3 года.

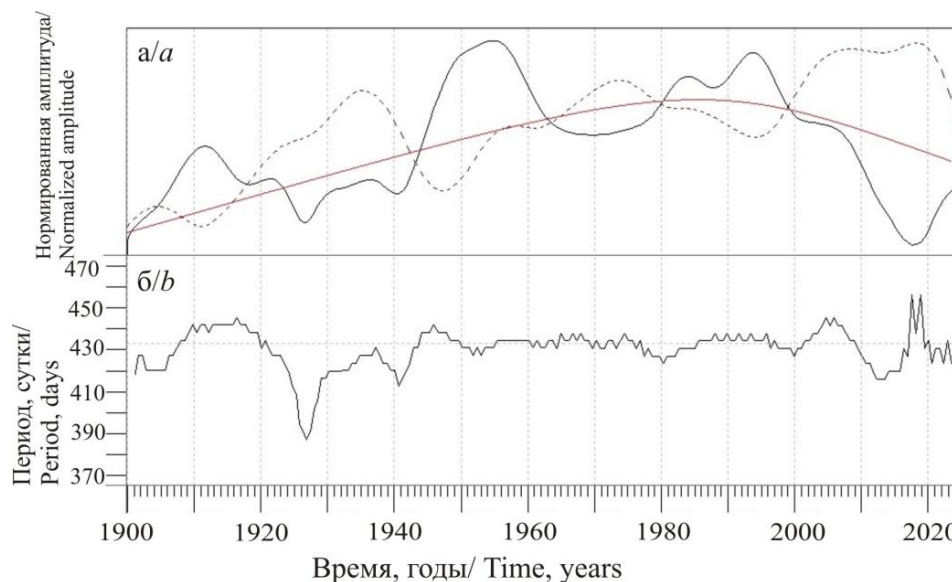


Рис. 5. Вариации ЧКП в 1900–2024 гг.: а – огибающая вариации амплитуды (сплошная линия – огибающая вариации амплитуды ЧКП, штриховая линия – огибающая вариации амплитуды годовой составляющей, красная линия – это маркер, средняя линия для более наглядного сравнения этих кривых); б – вариация периода колебаний ЧКП /

Fig. 5. Variations of the NCP in 1900–2024: а – envelope of the amplitude variation (solid line – envelope of the NCP amplitude variation, dashed line – envelope of the amplitude variation of the annual component, red line – marker, middle line for more visual comparison of these curves); б – variation of the period of NCP oscillations

На рисунке 5а показан результат фильтрации сигнала $R2$ и выделены вариации нормированных амплитуд ЧДП (черная сплошная линия) и составляющей ГДП (пунктирная линия). Плавная красная линия на рисунке 5а показывает некий условный уровень, относительно которого компоненты ЧДП и ГДП меняются в противофазе. Это убедительно доказывает, что увеличение амплитуды одной компоненты совпадает с уменьшением другой, или другими словами происходит перераспределение энергии колебаний между модами ЧДП и ГДП. Если остаться на старых позициях, то вряд ли это можно объяснить тем, что годовая компонента вызвана сезонным перераспределением масс на поверхности Земли (и почему тогда вообще

должна меняться амплитуда в таких широких пределах?). Если годовая компонента строго синхронизируется орбитальным периодом Земли, то период ЧДП меняется в диапазоне 410–440 суток. Резкий скачок в 1916–1918 годах и в 2018 году (см. рис. 5б) связан не с изменением периода, а с еще не объясненной перестройкой фазы, которая всегда происходит, когда амплитуда ЧДП достигает своих минимальных значений.

Аналогичным образом ведет себя мода 6.3 года, вариация амплитуды которой показана на рисунке 6а (сплошная линия) и периода 6.2 года (рис. 6б). С одной стороны мы видим, что в настоящую эпоху, в отличие от первой половины рассматриваемого периода наблюдений, энергия этой моды резко упала (условный уровень на рис. 5а, красная линия). Перестройка фазы этой моды происходила в период 1930–1940 годов и начинается в настоящее время. Это снова приведет к росту амплитуды (энергии) данной компоненты и спаду общего уровня амплитуд годовой и чандлеровской компонент, что собственно можно уже наблюдать в настоящую эпоху (см. рис. 5а).

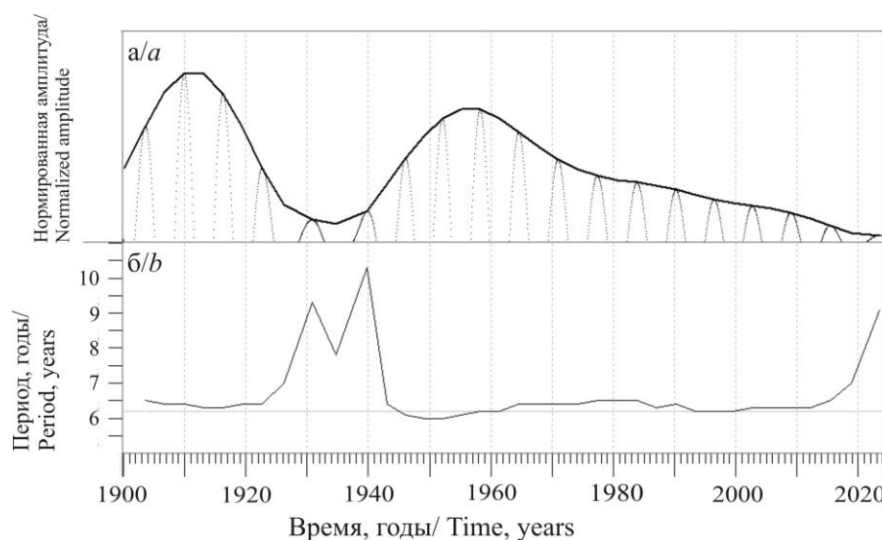


Рис. 6. Вариации амплитуды моды и периода движения Северного полюса в 1900–2024 гг.: а – амплитуды моды с периодом 6.3 года; б – периода (тонкая серая горизонтальная линия соответствует ровно трети периода движения лунных узлов в 6.2 года) /

Fig. 6. Variations in the amplitude of the mode and the period of the North Pole motion in 1900–2024: а – amplitudes of the mode with a period of 6.3 years; б – period (the thin gray horizontal line corresponds to exactly one third of the period of the lunar nodes motion of 6.2 years)

В настоящей работе не предлагается новый механизм происхождения чандлеровской составляющей движения полюса, но по-новому интерпретируется вид спектра движения полюса. Главным остается и вопрос: почему в исходном сигнале R не проявляет себя мода с периодом 538 суток, которая имеет такое важное значение для новой интерпретации спектральной картины? Отметим, что на основе примененного метода (спектральный анализ огибающей «шума» в определенной полосе частот) для деформационных данных земной коры (данные Баксанского лазерного интерферометра [Милюков и др., 2007]) были получены практически все теоретически предсказанные приливные волны в самом широком частотном диапазоне, которые невозможно было выделить в исходном деформационном ряде, и это при двадцатилетнем периоде наблюдений. Такой же подход был применен для ряда

вариации скорости вращения Земли LOD по данным бюллетеня MCB3 EOP14C04. Огибающая кривая строилась по «шуму» в полосе 100–10 суток. Спектральный анализ позволил выделить в огибающей известные приливные волны с периодами 182.7, 31.81, 27.55, 14.76, 13.77 суток, которые присутствовали и в исходном ряде LOD [Мясников, 2024]. Но кроме этого, уверенно были выделены моды с периодами: 18.62 лет, 27.093, 23.942, 18.707, 18.661, 11.049 суток, которые не были обнаружены в спектре исходного ряда.

Для каждого из приведенных выше рядов данных существует свой частотный диапазон, пригодный для дополнительного анализа по огибающей «шума». Так, для ряда данных движения полюса это диапазон 30–100 суток.

В хронологическом порядке сначала был установлен именно тот факт, что годовая и чандлеровская компонента ведут себя в противофазе (рис. 5), который был интерпретирован как взаимодействие двух связанных осцилляторов, которые находятся в постоянном обмене энергией. Но появление моды «N» с периодом 538 суток позволило более радикально пересмотреть и эту позицию, а именно существование одного осциллятора с изменяющимися параметрами под действием в первую очередь гравитации Луны.

Заключение

Основным результатом проведенных исследований является выделение в спектрах вариаций движения Северного полюса Земли короткопериодных компонент и обоснование их единой природы. Их периодичность близка к циклам крупных (с магнитудой $M \geq 7.0$) землетрясений Мира, приведенных в работе [Куликова, 2004]: 66, 25.7, 16.6, 11.8, 6.44, 2.56, 1.55 лет. Это позволяет ставить в качестве проблемы исследование связи сейсмичности и ротационного режима Земли.

Возможная связь астрономической компоненты с формированием и стилем современных геодинамических процессов обсуждалась в работе [Левин, 2000]. Ключевым при этом является вопрос о механизме преобразования энергии, возникающей при нутации оси вращения Земли, в энергию геодинамических процессов. В качестве такого механизма, как показано на примере формирования структуры Центрального сегмента Большого Кавказа [Стогний, Стогний, 2024], могут быть геологические течения на различных гипсометрических уровнях литосферы. На основе этой методики могут разрабатываться модели формирования напряженно-деформированного состояния литосферы и очаговых зон землетрясений сейсмоактивных регионов. Следует ожидать, что цикличность этих процессов будет определяться, как показано в настоящей работе, Чандлеровской составляющей и другими короткопериодными компонентами движения полюсов Земли.

Поиск закономерностей в характере сейсмической активности регионов, в частности, Северного Кавказа, и их связи с циклическими геодинамическими процессами представляет собой самостоятельную проблему, где результаты исследований по изучению вариаций компонент движения полюса Земли, представленные в настоящей статье, являются ее первым этапом.

Литература

1. Алиев М.А., Магомедов А.Г., Алибеков М.С. Всплески сейсмической активности на территории Турции в октябре 2011 и феврале 2023 г. и их связь с вариациями сейсмичности Предкавказья. // Труды Института геологии ДНЦ РАН. – 2023. – № 1(92). – С. 38–53.

2. Баренбаум А.А. Галактика, Солнечная система, Земля. Соподчинённые процессы и эволюция. М.: ГЕОС, 2002. – 394 с.
3. Бурдзиева О.Г., Ревазов М.О., Кортиев А.Л. Гогичев Р.Р. Влияние воздействий геодинамических процессов на геоэкологическую нагрузку горного региона. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 166–179. DOI: 10.46699/VNC.2024.37.52.001.
4. Вольвач А.Е., Курбасова Г.С., Вольвач Л.Н., Ипатов А.В. Особенности движения географического северного полюса Земли и скачки в геомагнитном поле. // Космические исследования. – 2022. – Т. 60. № 4. – С. 315–324.
5. Кочнев В.А. Детальная модель источников магнитного поля ядра Земли, полученная в результате решения обратной задачи магнитометрии. // Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64. № 4. – С. 559–579.
6. Крамер М.В., Молоденский М.С. Земные приливы и нутация Земли. М.: Изд. АН СССР, 1961. – 40 с.
7. Куликов К.А. Изменяемость широт и долгот. М.: Физматгиз, 1962. – 400 с.
8. Куликова В.В. Неотвратимый маятник (или историческая драма человечества в солнечных циклах). // Философский и науковедческий аспекты развития естествознания. / Отв. редакторы В.Д. Михайлов, В.В. Стогний. Якутск: Изд. ЯГУ, 2004. – С. 77–84.
9. Куликова В.В., Куликов В.С., Бычкова Я.В., Бычков А.Ю. История Земли в галактических и солнечных циклах. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2005. – 250 с.
10. Левин Б.В. Об астрономической компоненте тектонической силы. // Материалы XXXIII Тектонического совещания Общие вопросы тектоники России. Тектоника России. М.: ГЕОС, 2000. – С. 286–287.
11. Литасов К.Д., Шацкий А.Ф. Современные представления о составе ядра Земли. // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. №1. – С. 31–62.
12. Милюков В.К., Кобаев А.В., Лагуткина А.В., Миронов А.П., Мясников А.В. Наблюдения приливных деформаций земной коры в Приэльбрусье. // Физика Земли. – 2007. – № 11. – С. 21–29.
13. Мясников А.В. Влияние приливной волны M_2 на высокочастотную составляющую вариации параметров вращения Земли. // Динамические процессы в геосферах. – 2024. – Т. 16. № 2. – С. 22–27.
14. Научное наследие И.М. Сухова. Гравитация и геологические процессы. Очерки по истории геологических знаний. Вып. 29. СПб.: ВСЕГЕИ, 1994. – 153 с.
15. Отнес Р., Энноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982. – 305 с.
16. Павленкин А.Д., Межевов Ю.В. Геодинамические системы Земли и их симметрия. // Геофизика. – 2009. – № 3. – С. 49–58.
17. Перепелкин В.В., Рыхлова Л.В., Вэй Ян Сое. О синфазности вариаций параметров движения земного полюса и прецессии орбиты. // Астрономический журнал. – 2022. – Т. 99. № 1. – С. 75–87.
18. Стогний В.В. Физика планет Солнечной системы: учебное пособие для вузов. 2-е изд., исправленное и дополненное. – СПб.: Лань, 2023. – 248 с.
19. Стогний В.В., Стогний Г.А. Глубинное строение и реологическая стратификация земной коры Центрального сегмента Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 6–20. DOI: 10.46699/VNC.2024.37.52.001.
20. Тарakanов Ю.А. Новый тип строения и динамики Земли, Луны, Венеры и Марса. // Геофизика. – 1999. – № 5. – С. 62–68.
21. Kurbasova G.S., Rykhlova L.V., Shlikar G.N. The empirical Melchior laws and parametric excitation of the Chandler wobble. // Astronomical Journal. – 2003. – Vol. 47. No. 6. – pp. 525–530. DOI: 10.1134/1.1583780.
22. Newcomb S. On the dynamics of Earth's rotation, with respect to the periodic variations of latitude. // Monthly Notes. – 1892. – Vol. 52.
23. Ormsby J.F. Design of numerical filters with application to missile data processing. // Journal of the association for computing machinery. – 1961. – Vol. 8(3).

24. Wang G., Liu L., Su X., Liang X. et al. Variable Chandler and annual wobbles in Earth's polar motion during 1900–2015. // *Surveys in Geophysics*. – 2016. – Vol. 37(6). – pp. 1075–1093.
25. Woolard E. Theory of the rotation of the Earth around its center of mass. Vol. 15. Part 1. Washington: United States Government Print Office, 1953. – 165 p.

References

1. Aliyev M.A., Magomedov A.G., Alibekov M.S. Bursts of seismic activity in Turkey in October 2011 and February 2023 and their relationship with seismicity variations in the Ciscaucasia. *Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2023. No. 1(92). pp. 38–53. (In Russ.)
2. Barenbaum A.A. *Galaxy, Solar System, Earth. Subordinate Processes and Evolution*. Moscow. GEOS. 2002. 394 p. (in Russ.)
3. Burdzieva O.G., Revazov M.O., Kortiev A.L., Gogichev R.R. Influence of geodynamic processes on the geoecological load of a mountainous region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 166–179. DOI: 10.46699/VNC.2024.37.52.001. (In Russ.)
4. Volvach A.E., Kurbasova G.S., Volvach L.N., Ipatov A.V. Features of the movement of the Earth's geographical north pole and jumps in the geomagnetic field. *Space Research*. 2022. Vol. 60. No. 4. pp. 315–324. (In Russ.)
5. Kochnev V.A. Detailed model of the sources of the magnetic field of the Earth's core, obtained as a result of solving the inverse problem of magnetometry. *Geology and Geophysics*. 2023. Vol. 64. No. 4. pp. 559–579. (In Russ.)
6. Kramer M.V., Molodensky M.S. *Earth tides and nutation of the Earth*. Moscow. Academy of Sciences USSR, 1961. 40 p. (In Russ.)
7. Kulikov K.A. *Variability of latitudes and longitudes*. Moscow. Fizmatgiz. 1962. 400 p. (In Russ.)
8. Kulikova V.V. The inevitable pendulum (or the historical drama of humanity in solar cycles). Philosophical and scientific aspects of the development of natural science. Responsible. Eds. V.D. Mikhailov, V.V. Stogny. Yakutsk. YSU. 2004. pp. 77–84. (In Russ.)
9. Kulikova V.V., Kulikov V.S., Bychkova Ya.V., Bychkov A.Yu. *History of the Earth in galactic and solar cycles*. Petrozavodsk. Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2005. 250 p. (In Russ.)
10. Levin B.V. On the astronomical component of tectonic force. In: *Proceedings of the XXXIII Tectonic Conference General issues of tectonics of Russia*. Tectonics of Russia. Moscow. GEOS. 2000. pp. 286–287. (In Russ.)
11. Litasov K.D., Shatsky A.F. Modern ideas about the composition of the Earth's core. *Geology and Geophysics*. 2016. Vol. 57. No. 1. pp. 31–62. (In Russ.)
12. Milyukov V.K., Kopaev A.V., Lagutkina A.V., Mironov A.P., Myasnikov A.V. Observations of tidal deformations of the Earth's crust in the Elbrus region. *Physics of the Earth*. 2007. No. 11. pp. 21–29. (In Russ.)
13. Myasnikov A.V. Influence of the tidal wave Mf on the high-frequency component of the variation in the parameters of the Earth's rotation. *Dynamic Processes in the Geospheres*. 2024. Vol. 16. No. 2. pp. 22–27. (In Russ.)
14. *Scientific heritage of I.M. Sukhov. Gravity and geological processes. Essays on the history of geological knowledge*. Issue 29. Saint Petersburg. VSEGEI. 1994. 153 p. (In Russ.)
15. Otnes R., Enokson L. *Applied analysis of time series*. Moscow. Mir. 1982. 305 p. (In Russ.)
16. Pavlenkin A.D., Mezhevov Yu.V. Geodynamic systems of the Earth and their symmetry. *Geophysics*. 2009. No. 3. pp. 49–58. (In Russ.)
17. Perepyolkin V.V., Rykhlova L.V., Wei Y.S. On the synphase of variations in the parameters of the Earth's pole motion and orbital precession. *Astronomical Journal*. 2022. Vol. 99. No. 1. pp. 75–87. (In Russ.)

18. Stogny V.V. Physics of the Solar System Planets. A Textbook for Universities. 2nd ed., revised and supplemented. Saint Petersburg. Lan. 2023. 248 p. (In Russ.)
19. Stogny V.V., Stogny G.A. Deep structure and rheological stratification of the Earth's crust of the Central segment of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 6–20. DOI: 10.46699/VNC.2024.37.52.001. (In Russ.)
20. Tarakanov Yu.A. New type of structure and dynamics of the Earth, Moon, Venus and Mars. *Geophysics*. 1999. No. 5. pp. 62–68. (In Russ.)
21. Kurbasova G.S, Rykhlova L.V., Shlikar G.N. The empirical Melchior laws and parametric excitation of the Chandler wobble. *Astronomical Journal*. 2003. Vol. 47. No. 6. pp. 525–530. DOI: 10.1134/1.1583780.
22. Newcomb S. On the dynamics of Earth's rotation, with respect to the periodic variations of latitude. *Monthly Notes*. 1892. Vol. 52.
23. Ormsby J.F. Design of numerical filters with application to missile data processing. *Journal of the association for computing machinery*. 1961. Vol. 8(3).
24. Wang G., Liu L., Su X., Liang X. et al. Variable Chandler and Annual Wobbles in Earth's Polar Motion During 1900–2015. *Surveys in Geophysics*. 2016. Vol. 37(6). pp. 1075–1093.
25. Woolard E. Theory of the rotation of the Earth around its center of mass. Vol. 15. Part 1. Washington: United States Government Print Office. 1953. 165 p.

УДК 551.24

DOI: 10.46698/VNC.2025.84.74.002

Оригинальная статья

Послойные тектонические срывы в осадочном чехле платформ и некоторые практические следствия

В.И. Попков[✉], И.В. Попков[✉]

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

Статья поступила: 12.03.2025, доработана: 30.04.2025, принята к публикации: 02.05.2025

Резюме: Актуальность работы. В соответствии с современными тектоническими концепциями литосферные плиты принято рассматривать как достаточно жесткие реологически однородные пассивные пластины. Считается, что горизонтальное сжатие играет заметную структурообразующую роль лишь в районах, прилегающих к мобильным поясам. Во внутренних частях плит образование дислокаций осадочного чехла, как правило, объясняется дифференцированными вертикальными подвижками блоков фундамента, деформирующими осадочный чехол. В представленной работе приведены сведения о внутриформационных послойных срывах и связанных с ними тектонических деформациях, развитых в чехле платформ. Выяснение особенностей их строения и условий образования позволяет получить важную информацию о геодинамической обстановке формирования дислокаций в осадочном разрезе платформ, а также может способствовать решению некоторых прикладных задач. **Целью исследований** является изучение послойных тектонических срывов и связанных с ними деформаций в осадочном разрезе платформенных территорий, а также причин их образования. **Методы исследования.** Изучение волновой картины, запечатленной на сейсмических временных разрезах, позволило получить информацию о морфологии субгоризонтальных срывов и связанных с ними складчатых дислокаций. Для более глубокого понимания строения погребенных тектонических срывов и правильной диагностики сейсмических данных использована информация, полученная нами при исследовании аналогичных дислокаций в естественных обнажениях кайнозойских отложений Туранской плиты. Привлечены сведения о тектонических нарушениях в осадочном чехле, полученные в процессе бурения глубоких скважин. Рассмотрены обнаруженные в керновом материале текстурные особенности дезинтегрированных интервалов пород, определена их природа. Ценную информацию о послойных срывах дали результаты специальных гидродинамических исследований на месторождениях углеводородов. **Результаты работы.** Обосновано широкое развитие в плитном комплексе платформенных территорий внутриформационных послойных срывов, свидетельствующих о важной роли горизонтальных тектонических движений в формировании внутриплитных дислокаций. Ответственными за их формирование являются тектонические импульсы, передающиеся в пределы платформ со стороны смежных мобильных поясов. Полученные результаты дают возможность по-новому подойти к решению ряда прикладных задач при поисках и разведке месторождений углеводородов и других полезных ископаемых.

Ключевые слова: послойные тектонические срывы, тангенциальный стресс, складчато-надвиговые дислокации, нефтегазоносность, опасные процессы.

Для цитирования: Попков В.И., Попков И.В. Послойные тектонические срывы в осадочном чехле платформ и некоторые практические следствия. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 50-62. DOI: 10.46698/VNC.2025.84.74.002

DOI: 10.46698/VNC.2025.84.74.002

Original paper

Layered tectonic disruptions in the sedimentary cover of platforms and some practical consequences

V.I. Popkov^{ORCID}, I.V. Popkov^{ORCID}

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

Received: 12.03.2025, revised: 30.04.2025, accepted: 02.05.2025

Abstract: Relevance. In accordance with modern tectonic concepts, lithospheric plates have been considered as rather rigid rheologically homogeneous passive plates. It is believed that horizontal compression plays a significant structural role only in areas adjacent to mobile belts. In the inner regions of the plates, the formation of dislocations of the sedimentary cover is usually explained by differentiated vertical movements of the basement blocks, deforming the sedimentary cover. The presented work provides information on intraformational layered disruptions and related tectonic deformations developed in the sedimentary cover of the platforms. Clarifying the features of their structure and conditions of formation allows us to obtain important information about the geodynamic situation of the formation of dislocations in the platform cover, and may also contribute to solving some applied problems. **The aim** of the research is to study layered tectonic disruptions and related deformations in the sedimentary section of the platform territories, as well as the causes of their formation. **Methods.** The study of the wave pattern captured on seismic time sections made it possible to obtain information about the morphology of subhorizontal faults and related folded dislocations. For a deeper understanding of the structure of buried tectonic faults and the correct diagnosis of seismic data, we used the information that was obtained when studying similar dislocations in natural outcrops of Cenozoic deposits of the Turanian Plate. The data on tectonic disturbances in the sedimentary cover obtained during drilling of deep wells are attracted. The textural features of the disintegrated rock interiors found in the core material are considered, and their nature is determined. The results of special hydrodynamic studies at hydrocarbon deposits have provided valuable information on layer-by-layer disruptions. **Results.** The widespread development of intraformational layered disruptions in the plate complex of platform territories is substantiated, indicating the important role of horizontal tectonic movements in the formation of intraplate dislocations. Responsible for their formation are tectonic impulses transmitted to the boundaries of the platforms from adjacent mobile belts. The results obtained make it possible to take a new approach to solving a number of applied problems in the search and exploration of hydrocarbon deposits and other minerals.

Keywords: layered tectonic disruptions, tangential stress, folding-thrust dislocations, oil and gas potential, hazardous processes.

For citation: Popkov V.I., Popkov I.V. Layered tectonic disruptions in the sedimentary cover of platforms and some practical consequences. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2025. 15(2): 50-62. DOI: 10.46698/VNC.2025.84.74.002

Введение

В соответствии с плейттектонической концепцией литосферные плиты обычно рассматриваются как достаточно жесткие реологически однородные пассивные пластины, где горизонтальное сжатие играет заметную структурообразующую роль лишь на участках, прилегающих к мобильным поясам. Во внутренних районах плит образование дислокаций осадочного чехла, как правило, объясняется

дифференцированными радиальными подвижками блоков фундамента, деформирующими осадочный чехол. Соответственно с этим предполагается, что складке в верхних горизонтах разреза должна соответствовать аналогичная структура и на глубине, включая поверхность фундамента.

В последние десятилетия получены многочисленные данные, указывающие на наличие в литосфере вертикальных и латеральных структурных, а также реологических неоднородностей. На их основе сформулирована новая мобилистская модель развития геологических процессов в литосфере, основанная на представлениях тектонической расслоенности литосферы [Пейве и др., 1983], предполагающая наличие в ней латеральных тектонических потоков [Латеральные потоки ..., 2013]. Наиболее ярко тектоническое расчленение литосферы на покровы, пластины и надвиги выражено в пределах мобильных зон (Кавказ, Урал, Тянь-Шань, Памир, Альпы, Аппалачи и др.), имеющих покровно-складчатое строение. Развитые в их пределах дислокации хорошо изучены как в естественных обнажениях, так и геофизическими методами [Дотдуев, 1986; Хаин, 2009; Albino et al., 2014; Allen, Armstrong, 2008; Bazhenov, Burtman, 2002; Kocyigit et al., 2001; Cavazza et al., 2019; Sobornov, 2021; Trexler et al., 2022 и др.].

Появилось также значительное количество работ, в которых приводятся убедительные сведения о широком развитии в осадочном чехле платформ бескорневых складчато-надвиговых дислокаций, формирование которых связано с горизонтальными тектоническими движениями [Камалетдинов и др., 1991; Попков, 1991; Reilinger, McClusky, 2006 и др.]. Очевидно, что этот процесс должен был сопровождаться образованием послойных срывов в самом осадочном чехле. Однако их выделение в разрезе является сложной задачей, поскольку скважинные наблюдения имеют точечный характер при ограниченном выносе кернового материала. К тому же изучению тектонических нарушений в кернах уделяется мало внимания. Поскольку при послойных срывах сохраняется стратиграфическая последовательность слоев и деформации не всегда отражаются на временных разрезах, возникают проблемы и при их картировании сейсмической разведкой. Усугубляет ситуацию неготовность многих геологов увидеть послойные срывы даже в естественных обнажениях, поскольку принято считать, что на платформах главную структуроформирующую роль играют вертикальные тектонические движения.

Учитывая изложенное, можно полагать, что приведенные в статье материалы могут способствовать решению данной проблемы и оценить ее практическую значимость.

Материалы и методы исследований

Наиболее ценную информацию о внутренней структуре осадочного разреза платформ содержат материалы сейсморазведки методом отраженных волн. Совместное использование данных бурения и сейсморазведки дало возможность не только стратифицировать отражающие горизонты, но и выполнить необходимые структурные построения. Изучение волновой картины на временных разрезах позволило установить важные детали морфологии, стратиграфической приуроченности и истории развития дислокаций, а также определить кинематическую природу разрывов.

При изучении тектонических нарушений в отложениях осадочного чехла использована информация о послойных срывах и «навешенных» антиклиналях, обнаруженных в пределах Скифско-Туранской, Печерской, Восточно-Европейской и Западно-Сибирской платформ, Терско-Каспийского краевого прогиба.

Для более глубокого понимания строения погребенных тектонических срывов и правильной диагностики сейсмических данных приведена информация, полученная нами при изучении аналогичных дислокаций в естественных обнажениях кайнозойских отложений западной части Туранской плиты. В зонах срывов отложения брекчированы, широко представлены дуплексы, структуры будинажа, зеркала скольжения, глинки трения, сферические тектонические «катуны», складки волочения и другие деформации, характерные для структур горизонтального скольжения.

Большое внимание уделено известным сведениям о тектонических нарушениях в осадочном чехле, полученным в процессе бурения глубоких скважин. Рассмотрены обнаруженные в керновом материале текстурные особенности дезинтегрированных интервалов пород, определена их природа. В результате полученной информации удалось документально обосновать присутствие в разрезе пологих зон дезинтеграции пород, связанных с послойными срывами.

Для определения механизма и геодинамической обстановки формирования послойных срывов, обуславливающих тектоническую расслоенность чехла платформ, привлечены данные по сейсмологии и GPS-наблюдений по территории Северного Кавказа и прилегающих к нему районов Скифско-Туранской платформы.

Ценную информацию о послойных срывах и их нефтегеологической роли дали результаты специальных гидродинамических и трассерных исследований, проведенных на месторождениях углеводородов. Полученные результаты позволили обосновать наличие в продуктивных интервалах разреза тектонизированных интервалов пород, обладающих повышенными емкостно-фильтрационными свойствами.

Результаты исследований и их обсуждение

Одним из наглядных примеров послойных тектонических срывов в платформенных отложениях, которые можно наблюдать непосредственно в обнажениях, являются Узунбасские дислокации Южного Мангышлака [Попков, 2010]. Здесь в пределах Куюлусской долины в горизонтально залегающих отложениях эоцена закартирована протяженная (более 4,5 км) система складчато-надвиговых дислокаций, состоящая из трех тектонических пластин. Ее фронтальная часть обнажена в бортовых уступах Узунбасского оврага. В поперечных разрезах отчетливо видно листрическое строение надвига, поверхность которого выполаживается с глубиной, переходя в послойный срыв (рис. 1).

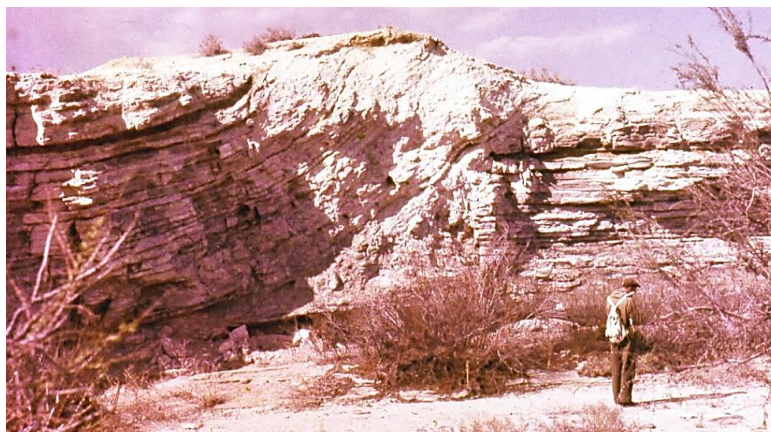


Рис. 1. Поперечный разрез фронтальной части тектонической пластины в бортовом обрыве оврага Узунбас /

Fig. 1. Transverse section of the frontal part of the tectonic plate in the side cliff of Uzunbas ravine

Слои эоцена в висячем крыле залегают параллельно поверхности сместителя, во фронтальной части тектонической пластины породы испытывают деформацию и частичную дезинтеграцию. В месте максимального изгиба разрыва в лежащем крыле отложения раздроблены, в ряде случаев тонкие прослои смяты в мелкие складки.

Фронт надвига выражен в рельефе дневной поверхности в виде топографического поднятия, что указывает на его современную тектоническую активность.

На отдельных участках русло оврага совпадает с простиранием фронта тектонической пластины, что позволяет получить важную информацию о морфологии послойного срыва (рис. 2). Протяженность обнажения составляет около 100 м. Отчетливо видна волнистая форма поверхности срыва, образующая две синформы, разделенные поднятием. Слои эоцена в аллохтоне залегают конформно по отношению к его подошве, в то время как в автохтоне они залегают горизонтально.

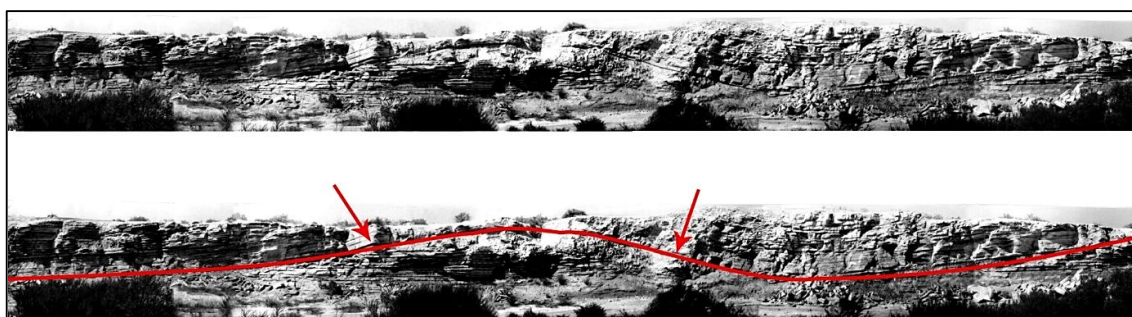


Рис. 2. Разрез вдоль фронта тектонической пластины. Внизу – интерпретация разреза.

Стрелками показана поверхность срыва /

Fig. 2. Section along the front of the tectonic plate. Below is the interpretation of the section.

The arrows show the breakdown surface

Во фронтальных частях двух других пластин образованы опрокинутые антиклинали, моноклинали с углами наклона слоев до 60 градусов, образующие в рельефе дневной поверхности протяженные гряды. В рассекающих их промоинах и оврагах можно наблюдать надвигание палеогеновых толщ на четвертичные отложения.

В зоне срыва отложения брекчированы, широко представлены дуплексы, структуры будинажа, зеркала скольжения, глина трения, сферические тектонические «катуны», складки волочения и другие деформации, характерные для структур горизонтального скольжения [Попков, 2010]. Мощность таких зон колеблется от 50 см до нескольких метров.

Надвиговая система осложнена поперечными сдвигами, в пределах которых глины эоцена сильно перемяты, рассланцованы и кальцитизированы. Сдвиги не прослеживаются за пределами фронтальных частей тектонических пластин.

Послойные срывы обычно удается закартировать сейсмическими методами в тех случаях, когда в их фронтальной части формируется асимметричная бескорневая антиклиналь. Наглядным примером могут служить дислокации в платформенном чехле северной части Азовского моря, где складчато-надвиговые дислокации и листрические разрывы определяют общий стиль тектоники Северо-Азовского прогиба (рис. 3). В пределах его северного борта тектонические пластины докембрийского фундамента проникают в перекрывающие меловые и кайнозойские отложения, формируя характерные фронтальные антиклинали. Здесь же можно наблюдать и «навешенные» антиклинали и послойные срывы (центральная часть разреза).

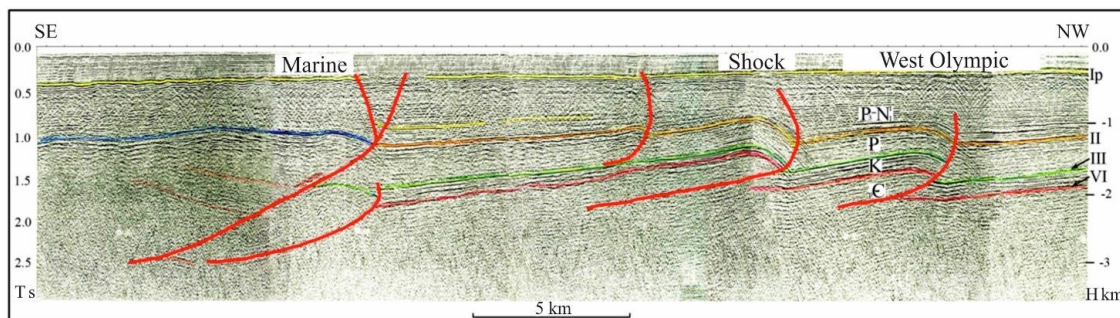


Рис. 3. Дислокации в платформенном чехле Северо-Азовского прогиба.

Отражающие горизонты: Ip – кровля майкопа, II – подошва олигоцена, III – кровля верхнего мела, VI – подошва нижнего мела /

Fig. 3. Dislocations in the platform cover of the North Azov trough.

Reflecting horizons: Ip – Maikop roof, II – Oligocene sole, III – Upper Cretaceous roof, VI – Lower Cretaceous sole

Послойные срывы отчетливо выражены и на временных сейсмических разрезах в платформенных отложениях Северного Каспия. Приурочены они к подошвенной части алевролитов-аргиллитовых толщ альба, залегающей на карбонатно-песчаных отложениях апта (рис. 4). Накопление отложений происходило в мелководно-морской шельфовой обстановке [Чуркина и др., 2024]. Срывы, по мере продвижения в север-северо-восточном направлении, изгибаются кверху с образованием малоамплитудных антиклиналей в перекрывающем комплексе. В левой части разреза видно увеличение мощности альбских отложений по сравнению с более северными районами, что может быть связано с их нагнетанием во фронтальной части наиболее крупного надвига. Последний проникает в вышележащие отложения, разрывая осадочный чехол на всю его мощность.

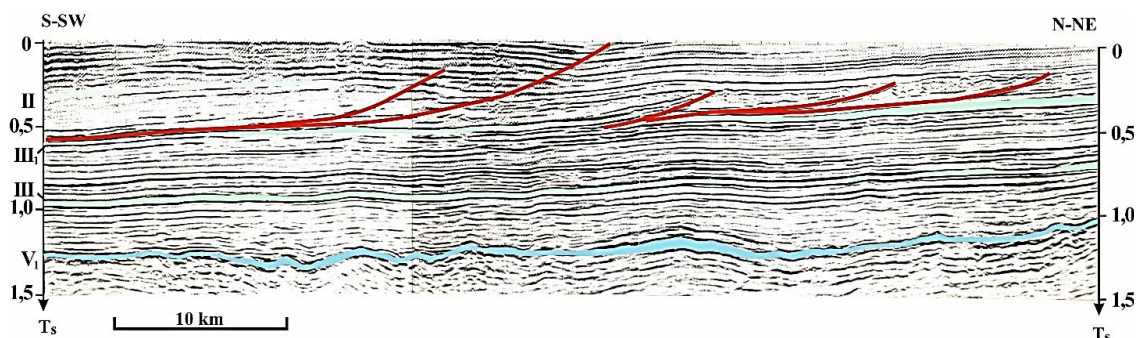


Рис. 4. Временной разрез, иллюстрирующий тектоническую природу срывов в платформенном чехле Каспийского моря. Соотношение масштабов 1:1.

Отражающие горизонты: в подошве: V₁ – юры; III – нижнего мела; III₁ – апта; II – сенон-турона /

Fig. 4. Time section illustrating the tectonic nature of faults in the platform cover of the Caspian Sea.

Scale ratio 1:1. Reflecting horizons: in the base: V₁ – Jurassic; III – Lower Cretaceous; III₁ – Aptian; II – Senon-Turonian

Отражение фронтальных частей альбских тектонических чешуй в отложениях сеномана в виде антиклинальных изгибов слоев, разрыв основным надвигом перекрывающих верхнемеловых и кайнозойских толщ говорят о тектонической природе дислокаций и их молодости.

Наличие послойных срывов в среднеюрско-нижнемеловом разрезе северной части Скифско-Туранской плиты в пределах Северного Каспия подтверждено также материалами глубоких скважин практически на всех разбуренных площадях (Широтное, Хвалынское, Ракушечное, Ю. Корчагина и др.) [Анисимов, 2023; Касьянова, 2017]. Обнаружено, как минимум, тринадцать интервалов развития тектонических брекчий, насыщенных многочисленными субгоризонтальными трещинами и зеркалами скольжения (рис. 5). Местами породы практически полностью раздроблены, образуя сыпучую тонкообломочную фракцию. Толщина таких интервалов колеблется от первых дециметров до 2–3 м.

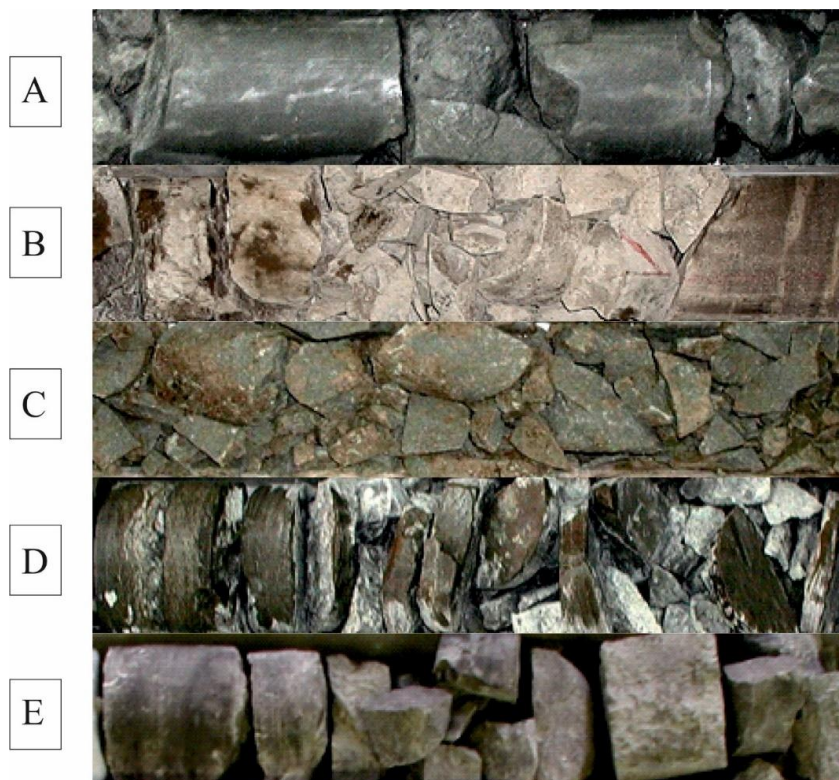


Рис. 5. Интервалы дробления пород в мезозойском разрезе Каспийского моря [Анисимов, 2023].
Скважины: А – Ракушечная 1; В, С – Хвалынская 3; D, E – Хвалынская 4 /

Fig. 5. Rock crushing intervals in the Mesozoic section of the Caspian Sea [Anisimov, 2023].
Wells: A – Rakushechnaya 1; B, C – Khvalynskaya 3; D, E – Khvalynskaya 4

В отдельных случаях наблюдается концентрация послойных срывов, в результате чего в интервале 25–30 м было обнаружено от 4 до 7 горизонтов дробления. В результате этого происходит наложение и суммирование деформаций, приводящее к образованию достаточно значительной по толщине зоны повышенной тектонической трещиноватости и флюидопроводимости. При этом отсутствует какая-либо взаимосвязь положения срывов с литологическим составом пород или с их возрастом [Касьянова, 2017].

Таким образом, есть все основания говорить о тектонической расслоенности платформенного чехла молодой Скифско-Туранской платформы в пределах Северного Каспия, обусловленной развитием в разрезе многочисленных послойных срывов, расчленивших его на ряд литопластин. Очевидна молодость дислокаций, о чем свидетельствует широкий стратиграфический диапазон распространения по-

слоистых срывов с проникновением некоторых из них в самые верхние горизонты чехла, раскрытость связанных с ними тектонических трещин, а также наличие аналогичных структур на прилегающих районах суши.

Морфология дислокаций свидетельствует об их формировании в результате бокового сжатия, направленного в север-северо-восточном направлении. Источником тангенциального стресса служит продвижение на север Аравийской плиты [Леонов и др., 2001; Philip et al., 1989], глубоко вклинившейся в Альпийский покровно-складчатый пояс с последующей трансляцией тектонических напряжений в пределы молодой платформы. Результаты этого воздействия особенно ярко проявляются в непосредственно прилегающих к нему районах Дагестанского клина, где сформирована система дуплексов, последовательно надвинутых друг на друга тектонических пластин, бескорневых складок, в том числе в миоценовых отложениях, сгруппированных в линейные антиклинальные зоны северной и северо-восточной вергентности [Соборнов, 2019].

Важным моментом современной геодинамики по данным GPS-наблюдений является быстрое горизонтальное смещение Северного Кавказа в северо-восточном направлении со скоростями 26–28 мм/год. Возникающие при этом избыточные горизонтальные движения в пограничной области Северного Кавказа и Скифской плиты обуславливают высокую современную геодинамическую активность и сейсмичность этой переходной зоны [Свалова, Заалишвили, 2024; Milyukov et al., 2015].

Воздействие северного дрейфа Аравийской плиты сказывается на распределении горизонтальных напряжений в пределах Евразийской плиты на расстояние до полутора–двух тысяч километров от ее южного края [Копп, 2005; Леонов и др., 2001]. Рассмотренные выше дислокации находятся к северо-востоку от Дагестанского клина на удалении всего лишь 300–350 км.

Подобные деформации срыва известны и в других регионах, например, в восточных районах Печерской и Русской плит. Показано, что их образование обусловлено срывом и последующими латеральными перемещениями осадочных толщ как по поверхности фундамента, так и внутри чехла [Камалетдинов и др., 1991; Юдин, 1992]. Связанные с ними складки являются навешенными, бескорневыми. Контролирующие их фронтальные части надвигов резко выполаживаются с глубиной с переходом в субгоризонтальные срывы. Бескорневой характер антиклиналей подтверждается данными сейсморазведки и бурения, а также непосредственными наблюдениями структур в естественных обнажениях [Юдин, 1992]. Образование данного типа дислокаций связано с передачей напряжений в пределы прилегающих платформенных территорий со стороны Уральско-Кавказского складчато-надвигового пояса.

В ряде случаев тангенциальные напряжения приводят к тектоническому сучиванию и нагнетанию пластичных пород (соли, гипсы, глины, аргиллиты) с образованием аркообразного изгиба в вышележащих отложениях. Аргиллиты, подвергшиеся интенсивному механическому давлению, сильно перемяты, раздроблены, содержат многочисленные зеркала скольжения. За пределами таких участков локального раздува мощности разновозрастные отложения имеют спокойное залегание и выдержанную мощность. Такие участки деформированных пород обычно заключены между более жесткими толщами, испытывающими горизонтальные подвижки относительно друг друга, и являются типично интратектоническими. Также они часто сопровождаются развитием зон аномально высоких пластовых давлений. По отношению к нижележащим горизонтам такие дислокации являются резко дисгар-

моничными, не находя отражения в их структуре. Примером могут служить многие дислокации Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, зоны «аномального бажена» Западной Сибири [Камалетдинов и др., 1991].

Полученные доказательства широкого развития в плитном комплексе платформ послонных срывов имеют важное значение при решении ряда прикладных задач. К примеру, наличие в чехле «подвешенных» антиклиналей требует дифференцированного подхода при выборе поисковых объектов в различных стратиграфических уровнях нефтегазоносных осадочных бассейнов. Поиск ловушек нефти и газа в таких случаях нужно вести отдельно по каждому структурному уровню.

Другим важным следствием тектонической расслоенности чехла является то, что пологие надвиги и послонные срывы сопровождаются зонами брекчирования, повышенной трещиноватости, которые могут являться путями латеральной миграции углеводородов. Связанные с ними интервалы дробления пород увеличивают коллекторский потенциал нефтегазоносных пластов. В случае сближения разрывов в продуктивном интервале образуется сложнопостроенная многоярусная система горизонтов с различными емкостно-фильтрационными свойствами. В случае развития срывов в породах, не обладавших первоначальными коллекторскими свойствами, их емкостные параметры определяются присутствием горизонтальных трещинных систем. Данные заключения убедительно подтверждаются результатами комплексного анализа результатов трассерных и геофлюидодинамических исследований волжско-неокомской части резервуара месторождений углеводородов, открытых на акватории Северного Каспия [Касьянова и др., 2015]. Соответственно эти сведения необходимо учитывать при разработке месторождений нефти и газа.

Кроме этого, в низкопроницаемых интервалах разреза при благоприятных структурных условиях (первоначальный волнистый характер поверхности послонного срыва или образование антиклинального изгиба при последующей его деформации) подобные зоны разуплотнения могут служить самостоятельными ловушками нефти и газа.

Современные подвижки по послонным срывам в геодинамически активных регионах, как, например, в Восточном Предкавказье, приводят к срезанию и деформациям обсадных колонн на разрабатываемых месторождениях нефти и газа.

Подобного типа дислокации создают проблемы при разработке угольных месторождений Кузбасса, Кизеловского бассейна, Донбасса, Караганды [Михайлова, 1979]. К примеру, в Кадиевском районе Донбасса серия крупных пологих срывов, расположенных почти параллельно друг другу, рассекает массив через определенные интервалы. Каждый из этих срывов имеет свою «зону», которую пересекают его «апофизы» и небольшие разрывы наклонной ориентировки. Большое количество разрывов, не всегда прослеживающихся горными работами, весьма осложняет их проведение, в особенности при комплексной их механизации. К наиболее нарушенным участкам горных пород приурочены места внезапных выбросов угля и газа, здесь существует наибольшая опасность обводнения горных выработок, усложняется управление горным давлением, увеличивается опасность «вывалов» из кровли выработок и увеличивается опасность внезапного обрушения кровли. Кроме того, всякое, даже незначительное, нарушение горных пород со смещением усложняет и удорожает эксплуатацию месторождения, так как вызывает необходимость демонтажа и извлечения комплексов механизации и увеличивает дорогостоящие нарезные работы.

Перечисленные и многие другие факты ставят перед геологами задачу по выявлению такого рода разрывных нарушений и связанных с ними деформированных зон с целью учета при планировании последующих работ.

Выводы

Приведенные выше сведения свидетельствуют о широком развитии в плитном комплексе платформенных территорий внутриформационных послонных срывов, что ставит под серьезное сомнение широко распространенное мнение о примате радиальных тектонических движений в формировании внутриплитных дислокаций.

Установленные факты тектонической расслоенности чехла указывают на то, что континентальные платформы, являющиеся составной частью литосферных плит, не являются жесткими геологическими телами. В процессе своего развития они периодически испытывают воздействие сил бокового сжатия, приводящее к образованию в их чехле послонных срывов и внутриплитных деформаций. Ответственным за их формирование является транспрессивное воздействие тангенциальных напряжений, передающихся в пределы платформ со стороны смежных мобильных поясов на многие сотни километров.

Таким образом, тектоническая расслоенность осадочного чехла платформ, вне зависимости от их возраста, – объективно существующая реальность, требующая переосмысления многих представлений о геодинамической обстановке и механизмах формирования развитых в их пределах структур. Полученные при этом результаты могут способствовать решению ряда прикладных задач, связанных с проведением геологоразведочных работ и последующей разработкой месторождений полезных ископаемых.

Литература

1. Анисимов Л.А. Характер дислокаций в плитном комплексе Скифско-Туранской платформы. // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2023. – Вып. 109. – С. 30–40.
2. Дотдугев С.И. О покровном строении Большого Кавказа. // Геотектоника. – 1986. – № 5. – С. 94–106.
3. Камалетдинов М.А., Казанцева Т.Т., Казанцев Ю.В., Постников Д.В. Шарьяжно-надвиговая тектоника литосферы. М.: Наука, 1991. – 255 с.
4. Касьянова Н.А. Новый взгляд на строение и формирование Ракушечно-Широтного вала в Северном Каспии. // Геология нефти и газа. – 2017. – № 1. – С. 24–31.
5. Касьянова Н.А., Левченко В.С., Воронцова И.В., Анисимов Л.А., Попова П.Ф., Голенкин М.Ю., Халиуллов И.Р. Изучение современных «трещинных» фильтрационных путей в волжско-неокомской части резервуара месторождения им. Ю. Корчагина по результатам комплексного анализа данных трассерных и геофлюидодинамических исследований. // Геология нефти и газа. – 2015. – № 5. – С. 23–31.
6. Копп М.Л. Новейшие деформации Южного Урала и Мугоджар и их вероятное происхождение. // Геотектоника. – 2005. – № 5. – С. 36–61.
7. Латеральные потоки в литосфере. / Отв. редактор М.Г. Леонов. – М.: ГЕОС, 2013. – 318 с.
8. Леонов Ю.Г., Гущенко О.И., Копп М.Л., Расцветаев Л.М. Взаимосвязь позднекайнозойских напряжений и деформаций в Кавказском секторе Альпийского пояса и в его северном платформенном обрамлении. // Геотектоника. – 2001. – № 1. – С. 36–59.
9. Михайлова А.В. Поля деформаций при образовании надвига в моделях структур продольного сжатия. // В сборнике статей: Поля напряжений и деформаций в литосфере. / Отв. редакторы А.С. Григорьев, Д.Н. Осокина. – М.: Наука, 1979. – С. 236–244.

10. Пейве А.В., Руженцев С.В., Трифонов В.Г. Тектоническая расслоенность и задачи изучения литосферы континентов. // Геотектоника. – 1983. – № 1. – С. 3–13.
11. Попков В.И. Внутриплитные структуры бокового сжатия. // Геотектоника. – 1991. – № 2. – С. 13–27.
12. Попков В.И. Узунбасские дислокации (Южный Мангышлак). // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов Академии наук Республики Башкортостан. – 2010. – № 15. – С. 50–57.
13. Свалова В.Б., Заалишвили В.Б. Глубинная геодинамика и сейсмичность Кавказско-Анатолийского региона. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 77–89. DOI: 10.46698/VNC/2024.97.46.006.
14. Соборнов К.О. Вдвиговые деформации южного борта Терско-Каспийского прогиба: строение, формирование и нефтегазоносный потенциал. // Геология нефти и газа. – 2019. – № 6. – С. 19–30. DOI: 10.31087/0016-7894-2019-6-19-30.
15. Хаин В.Е. Большой Кавказ. // Тектоника южного обрамления Восточно-Европейской платформы. / Под редакцией В.Е. Хаина, В.И. Попкова. – Краснодар: КГУ, 2009. – С. 150–161.
16. Чуркина В.В., Коточкова Ю.А., Калмыков Г.А. Обстановки осадконакопления аптальбских отложений Северного Каспия. // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2024. – № 1. – С. 83–94. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-1-83-94.
17. Юдин В.В. Тектоническая расслоенность чехла Печорской плиты. // Народное хозяйство республики Коми. – 1992. – Т. 1. № 1. – С. 162–174.
18. Albino I., Cavazza W., Zattin M., Okay A., Adamia S.H., Sadradze N. Far-field tectonic effects of the Arabia–Eurasia collision and the inception of the North Anatolian Fault system. // Geological Magazine. – 2014. – Vol. 151. – pp. 372–379.
19. Allen M.B., Armstrong H.A. Arabia-Eurasia collision and the forcing of mid-Cenozoic global cooling. // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2008. – Vol. 265. – pp. 52–58.
20. Bazhenov M.L., Burtman V.S. Eocene paleomagnetism of the Caucasus (southwest Georgia): Oroclinal bending in the Arabian syntaxis. // Tectonophysics. – 2002. – Vol. 344. – pp. 247–259. DOI: /10.1016/S0040-1951(01)00189-5.
21. Cavazza W., Albino I., Galoyan G., Zattin M., Cattò S. Continental accretion and incremental deformation in the thermochronologic evolution of the Lesser Caucasus. // Geoscience Frontiers. – 2019. – Vol. 10. Issue 6. – pp. 2189–2202. DOI: 10.1016/j.gsf.2019.02.007
22. Kocyigit A., Yilmaz A., Adamia S., Kuloshvili S. Neotectonics of East Anatolia Plateau (Turkey) and Lesser Caucasus: implication for transition from thrusting to strike-slip faulting. // Geodinamica Acta. – 2001. – Vol. 14. – pp. 177–195. DOI: 10.1016/S0985-3111(00)01064-0.
23. Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblov G.M. Velocities of contemporary movements of the northern Caucasus estimated from GPS observations. // Geotectonics. – 2015. – Vol. 49. No. 3. – pp. 210–218. DOI: 10.1134/S0016852115030036.
24. Philip H., Cisternas A., Gvishiani A., Gorshkov A. The Caucasus: an actual example of the initial stage of continental collision. // Tectonophysics. – 1989. – Vol. 161. No. 1–2. – pp. 4–21. DOI: 10.1016/0040-1951(89)90297-7.
25. Reilinger R.E., McClusky S.C. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. // Journal of Geophysical Research. – 2006. – Vol. 111. – pp. 54–71. DOI: 10.1029/2005JB004051.
26. Sobornov K. Structure and evolution of the Terek-Caspian fold-and-thrust belt: New insights from regional seismic data. // Journal of Petroleum Geology. – 2021. – Vol. 44. – pp. 259–286.
27. Trexler C.C., Cowgill E., Niemi N.A., Vasey D.A., Godoladze T. Tectonostratigraphy and major structures of the Georgian Greater Caucasus: Implications for structural architecture, along-strike continuity, and orogeny evolution. // Geosphere. – 2022. – Vol. 17. – pp. 1–30. DOI: 0.1130/GES02385.1.

References

1. Anisimov L.A. The nature of dislocations in the plate complex of the Scythian-Turanian platform. The bowels of the Volga region and the Caspian Sea. 2023. Issue 109. pp. 30–40. (In Russ.)
2. Dotduev S.I. On the cover structure of the Greater Caucasus. *Geotectonics*. 1986. No. 5. pp. 94–106. (In Russ.)
3. Kamaletdinov M.A., Kazantseva T.T., Kazantsev Yu.V., Postnikov D.V. Thrust-thrust tectonics of the lithosphere. Moscow. Nauka. 1991. 255 p. (In Russ.)
4. Kasyanova H.A. A new look at the structure and formation of the Shell-Latitudinal shaft in the Northern Caspian Sea. *Geology of Oil and Gas*. 2017. No. 1. pp. 24–31. (In Russ.)
5. Kasyanova N.A., Levchenko V.S., Vorontsova I.V., Anisimov L.A., Popova P.F., Golenkin M.Yu., Khaliullov I.R. Study of modern “fractured” filtration routes in the Volga region the Neocomian part of the reservoir of the Y. Korchagin field based on the results of a comprehensive analysis of data from tracer and geofluidodynamic studies. *Geography of Oil and Gas*. 2015. No. 5. pp. 23–31. (In Russ.)
6. Kopp M.L. The latest deformations of the Southern Urals and Mugodzhaz and their probable occurrence. *Geotectonics*. 2005. No. 5. pp. 36–61. (In Russ.)
7. Lateral flows in the lithosphere. Ed. M.G. Leonov. Moscow. GEOS. 2013. 318 p. (In Russ.)
8. Leonov Yu.G., Gushchenko O.I., Kopp M.L., Rastsvetaev L.M. Interrelation of Late Cenozoic stresses and deformations in the Caucasian sector of the Alpine belt and in its northern platform framework. *Geotectonics*. 2001. No. 1. pp. 36–59. (In Russ.)
9. Mikhailova A.V. Fields of deformations during thrust formation in models of longitudinal compression structures. In: *Stress and strain fields in the lithosphere*. Eds. A.S. Grigoriev, D.N. Osokina. Moscow. Nauka. 1979. pp. 236–244. (In Russ.)
10. Peive A.V., Ruzhentsev S.V., Trifonov V.G. Tectonic stratification and the tasks of studying the lithosphere of continents. *Geotectonics*. 1983. No. 1. pp. 3–13. (In Russ.)
11. Popkov V.I. Intraplate structures of lateral compression. *Geotectonics*. 1991. No. 2. pp. 13–27. (In Russ.)
12. Popkov V.I. Uzunbassky dislocations (Southern Mangyshlak). *Geology. Proceedings of the Department of Earth Sciences and Natural Resources of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*. 2010. No. 15. pp. 50–57. (In Russ.)
13. Svalova V.B., Zaalishvili V.B. Deep geodynamics and seismicity of the Caucasian-Anatolian region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 77–89. DOI: 10.46698/VNC/2024.97.46.006. (In Russ.)
14. Sobornov K.O. Thrust deformations of the southern side of the Tersk-Caspian basin: structure, formation and oil and gas potential. *Geology of Oil and Gas*. 2019. No. 6. pp. 19–30. DOI: 10.31087/0016-7894-2019-6-19-30. (In Russ.)
15. Khain V.E. Greater Caucasus. Tectonics of the southern framing of the East European Platform. Eds. V.E. Khaina, V.I. Popkov. Krasnodar. KubSU. 2009. pp. 150–161. (In Russ.)
16. Churkina V.V., Kotochkova Yu.A., Kalmykov G.A. Sedimentation conditions of the Aptian-Albian deposits of the Northern Caspian Sea. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2024. No. 1. pp. 83–94. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-1-83-94. (In Russ.)
17. Yudin V.V. Tectonic stratification of the cover of the Pechora Plate. *National Economy of the Komi Republic*. 1992. Vol. 1. No. 1. pp. 162–174. (In Russ.)
18. Albino I., Cavazza W., Zattin M., Okay A., Adamia S.H., Sadradze N. Far-field tectonic effects of the Arabia–Eurasia collision and the inception of the North Anatolian Fault system. *Geological Magazine*. 2014. Vol. 151. pp. 372–379.
19. Allen M.B., Armstrong H.A. Arabia-Eurasia collision and the forcing of mid-Cenozoic global cooling. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2008. Vol. 265. pp. 52–58.
20. Bazhenov M.L., Burtman V.S. Eocene paleomagnetism of the Caucasus (southwest Georgia): Oroclinal bending in the Arabian syntaxis. *Tectonophysics*. 2002. Vol. 344. pp. 247–259. DOI: 10.1016/S0040-1951(01)00189-5.

21. Cavazza W., Albino I., Galoyan G., Zattin M., Cattò S. Continental accretion and incremental deformation in the thermochronologic evolution of the Lesser Caucasus. *Geoscience Frontiers*. 2019. Vol. 10. Issue 6. pp. 2189–2202. DOI: 10.1016/j.gsf.2019.02.007.
22. Kocyigit A., Yilmaz A., Adamia S., Kuloshvili S. Neotectonics of East Anatolia Plateau (Turkey) and Lesser Caucasus: implication for transition from thrusting to strike-slip faulting. *Geodinamica Acta*. 2001. Vol. 14. pp. 177–195. DOI: 10.1016/S0985-3111(00)01064-0.
23. Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblov G.M. Velocities of contemporary movements of the northern Caucasus estimated from GPS observations. *Geotectonics*. 2015. Vol. 49. No. 3. pp. 210–218. DOI: 10.1134/S0016852115030036.
24. Philip H., Cisternas A., Gvishiani A., Gorshkov A. The Caucasus: an actual example of the initial stage of continental collision. *Tectonophysics*. 1989. Vol. 161. No. 1–2. C. 4–21. DOI: 10.1016/0040-1951(89)90297-7.
25. Reilinger R.E., McClusky S.C. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research*. 2006. Vol. 111. pp. 54–71. DOI: 10.1029/2005JB004051.
26. Sobornov K. Structure and evolution of the Terek-Caspian fold-and-thrust belt: New insights from regional seismic data. *Journal of Petroleum Geology*. 2021. Vol. 44. pp. 259–286.
27. Trexler C.C., Cowgill E., Niemi N.A., Vasey D.A., Godoladze T. Tectonostratigraphy and major structures of the Georgian Greater Caucasus: Implications for structural architecture, along-strike continuity, and orogeny evolution. *Geosphere*. 2022. Vol. 17. pp. 1–30. DOI: 0.1130/GES02385.1.

УДК 550.34; 539.3

DOI: 10.46698/VNC.2025.25.10.001

Оригинальная статья

О зоне пониженной сейсмической опасности при переходе горной территории в равнинную

В.А. Бабешко¹, О.В. Евдокимова², О.М. Бабешко¹,
В.С. Евдокимов¹

¹ Кубанский государственный университет, Россия, 350040, г. Краснодар,
ул. Ставропольская, 149, e-mail: rector@kubsu.ru;

² Южный научный центр РАН, Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону,
пр. Чехова, 41, e-mail: ras@ssc-ras.ru, babeshko41@mail.ru

Статья поступила: 02.04.2025, доработана: 30.04.2025, принята к публикации: 05.05.2025

Резюме: Актуальность работы состоит в необходимости поиска зон менее подверженных сейсмической опасности в территориях, в которых горные массивы переходят в равнины. Строгих механико-математических подходов исследования сейсмичности в таких территориях мало, в связи с тем, что они требуют решения некоторых проблем в теории интегральных уравнений. Целью проведенных исследований явилось выявление зоны пониженной сейсмичности в области перехода горной территории в равнинную.

Методы работы. Для исследования использовано решение контактной задачи о концентрации контактных напряжений в зоне перехода горного массива в равнинную территорию. Предполагается, что возвышающийся над равниной горный массив моделируется деформируемым штампом, который расположен на анизотропном полупространстве, свойственном строению гранитного слоя литосферной плиты. В работе учитываются приливные Лунные воздействия, описываемые временной функцией. Выполнение поставленной задачи потребовало построения решения двумерного интегрального уравнения Винера-Хопфа с анизотропным символом ядра интегрального уравнения. Для описания деформируемого штампа принято разложение решения граничной задачи для штампа сложной реологии по решениям граничных задач для штампов упрощенной реологии, даваемых уравнениями Гельмгольца. **Результаты исследования.** В процессе исследования, получено представление распределения контактных напряжений под деформируемым штампом. Установлено, что в приграничных зонах деформируемого штампа происходит, при приближении к прямолинейной границе, нарастание контактных напряжений. Для выявления зоны понижения концентрации контактных напряжений, изучен случай штампа с внутренним углом. Он содержит сектор, в который входят на плоскости два первых квадранта и часть третьего. Зона излома границы штампа, называемая внутренним углом, является наименее опасной. Безопасность увеличивается по мере увеличения раствора сектора штампа, что представлено в таблице. Дальнейшее увеличение сектора раствора штампа может привести к встречному расположению границ ущелья, приближающемуся к параллельным, что может привести к резонансам И.И. Воровича.

Ключевые слова: контактная задача, деформируемые штампы, пониженная сейсмичность, концентрация напряжений, горные территории.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, Кубанского научного фонда, региональный проект № 24-11-20006.

Для цитирования: Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Евдокимов В.С. О зоне пониженной сейсмической опасности при переходе горной территории в равнинную. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 63-72. DOI: 10.46698/VNC.2025.25.10.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.25.10.001

Original paper

About the zone of reduced seismic hazard in the transition from mountainous to flat terrain

V.A. Babeshko¹, O.V. Evdokimova², O.M. Babeshko¹, V.S. Evdokimov¹

¹ Kuban State University, 149 Stavropolskaya Str., Krasnodar 350040,
Russian Federation, e-mail: rector@kubsu.ru;

² 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: 02.04.2025, revised: 30.04.2025, accepted: 05.05.2025

Abstract: The relevance of the work lies in the need to search for areas with reduced seismic hazards in areas where mountain ranges turn into plains. There are few rigorous mechanical and mathematical approaches to studying seismicity in such areas, due to the fact that they require solving some problems in the theory of integral equations. **The aim** of the research was to identify a reduced seismicity zone in the area of transition from a mountainous territory to a flat one. **Methods.** The solution of the contact problem on the concentration of contact stresses in the transition zone of a mountain range to a flat terrain was used for the study. It is assumed that the mountain range towering above the plain is modeled by a deformable stamp, which is located on an anisotropic half-space characteristic of granite layer structure in the lithospheric plate. The work takes into account tidal lunar impacts described by the time function. The task required constructing a solution to the two-dimensional Wiener-Hopf integral equation with an anisotropic symbol for the kernel of the integral equation. To describe a deformable stamp, the solution of the boundary value problem for a stamp of complex rheology is decomposed into solutions of boundary value problems for stamps of simplified rheology given by the Helmholtz equations. **Results.** In the process of study, a representation of the distribution of contact stresses under a deformable die was obtained. It is established that in the boundary zones of the deformable stamp, an increase in contact stresses occurs as it approaches the rectilinear boundary. To identify the zone of decreasing contact stress concentration, the case of a stamp with an internal angle was studied. It contains a sector that includes the first two quadrants and part of the third quadrant on the plane. The fracture zone of the stamp boundary, called the inner corner, is the least dangerous, and safety increases as the stamp sector solution increases, as shown in the table. A further increase in the mortar sector of the stamp may lead to the opposite location of the gorge boundaries approaching parallel ones, which may lead to I.I. Vorovich resonances.

Keywords: contact problem, deformable stamps, reduced seismicity, stress concentration, mountainous territories.

Acknowledgements: The research was carried out with financial support of Russian Science Foundation, Kuban Science Foundation, regional project No. 24-11-20006.

For citation: Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Evdokimov V.S. About the zone of reduced seismic hazard in the transition from mountainous to flat terrain. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 63-72. DOI: 10.46698/VNC.2025.25.10.001

Введение

Так же, как и в предыдущей статье [Бабешко и др., 2025], в настоящей работе проводится исследование состояния сейсмичности в области перехода горной территории в равнинную на основе механического подхода.

В выполняемых исследованиях авторы пытаются полнее изучить возможности механики деформируемого твердого тела, теории прочности и разрушения для выявления зон повышенной сейсмичности, отслеживая, уровни концентрации напряжений, возникающих в горных территориях. Это делается, следуя научным рекомендациям выдающихся ученых академиков Г.А. Гамбурцева [Гамбурцев, 1982] и М.А. Садовского [Садовский и др., 1987]. В данной работе, как и в указанной статье, применяется механико-математический подход, рекомендованный ими. Шаги, направленные на рассмотрение горных территорий, как штампов, лежащих на деформируемых основаниях, на базальтовой границе Конрада, предпринимались в ряде работ. Однако рассматривались простейшие случаи прямолинейных границ между грядой и равниной. Задачи в такой постановке сводятся к одномерным и решаются достаточно просто методом Винера-Хопфа. Они дают на границе, под горной грядой, концентрацию контактных напряжений вида $x^{-1/2}$. В механике – это зона ослабленной прочности. Авторы статьи, разработали метод решения двумерных интегральных уравнений Винера-Хопфа, который применили в работе [Бабешко и др., 2025] (рис. 1). Он позволил выявить зону повышенной сейсмичности в угловой точке штампа. Учитывая, что конфигурации расположения горных территорий обладают большим разнообразием, авторы применили метод к решению задачи, когда горный массив окаймляет равнинную территорию, оставляя нетронутой зону в виде тупого угла (рис. 2).

В результате изучения концентрации контактных напряжений вдоль границы штампа выяснилось, что на прямолинейных участках она описывается функцией $x^{-1/2}$, а в угловой точке имеет меньший показатель, снижающийся по мере роста раствора угла штампа. Если граница штампа перейдет из третьего квадранта системы координат в четвертый и продолжит увеличение раствора, то в угловой точке контактные напряжения снизятся.

Однако границы штампа приблизятся к параллельным, образуя ущелье. Этот вопрос изучен в статье [Бабешко и др., 2024], где показано, что при наличии периодических приливных колебаний, такое расположение горных массивов может побудить возникновение резонансов И.И. Воровича, то есть зона угла окажется сейсмоопасной. Этот результат установлен в работе.

Излагаемое исследование, по возможности, учитывает богатый спектр методов и подходов замечательных работ известных исследователей [Заалишвили и др., 2021; Чернов, 1989; Lu et al., 2007; Chernov et al., 2020; Xia et al., 2004, 2005; Scholz et al., 1973; Mitchell et al., 2013, 2015; Di Toro et al., 2011], успешно применявших глубокие механико-математические методы в геофизике и науках о Земле.

В частности, в работе [Заалишвили и др., 2021] впервые выявлены важные особенности поведения среды в нелинейной постановке. В настоящей работе развивается метод решения и исследования двумерного интегрального уравнения Винера-Хопфа, возникающего в анизотропной контактной задаче теории упругости [Ворович, Бабешко, 1979]. Этот подход основан на открывшейся возможности рассмотрения контактных задач с деформируемым штампом, что достигается применением блочных элементов, являющихся объектами дискретного топологического пространства. В настоящее время топологические методы проникают в разные направления науки и инженерной практики [Awrejcewicz et al., 2021; Athore et al., 2021; Fernandez et al., 2021; Gonçalves et al., 2020; Huang et al., 2020; Pena, Rapun, 2020; Xavier et al., 2020]. С учетом подхода в этой работе оказалось возможным

выявить в одном из типов зон горных территорий зоны пониженной сейсмичности на фоне общей, существующей достаточно высокой, связанные с приливными колебаниями.

Постановка задачи

Будем рассматривать линейно-упругую многослойную среду конечной толщины, на верхней границе которой расположен деформируемый штамп, занимающий область первого квадранта. Для учета приливного воздействия Луны, считается, что штамп гармонически вертикально колеблется с частотой ω по закону, описываемому функцией $e^{-i\omega t}$, которая, в дальнейшем, исключается из линейной системы, оставляя амплитудные функции. На верхней границе многослойной среды располагается декартова система координат с осью oz , направленной по нормали наружу, и остальными осями ox, oy , расположенными в касательной плоскости. Принимая во внимание возможность применения универсального метода моделирования, позволяющего представлять решения граничной задачи для деформируемого штампа из материала сложной реологии разложенными по решениям граничных задач для уравнений простых реологий, применим в дальнейшем этот подход. Опираясь на этот подход, будем считать, что материал деформируемого штампа, имитирующего горную гряду, описывается уравнением Гельмгольца, рассматриваемым в первом квадранте, а штамп действует на среду без трения. Для решения контактной задачи с деформируемым штампом, предварительно требуется построить решения граничной задачи для деформируемого штампа, а уже потом обращаться к построению интегрального уравнения контактной задачи.

Метод решения

Опуская решение граничной задачи для деформируемого штампа, достаточно подробно изложенное в [Бабешко и др., 2025], приходим к решению двумерного интегрального уравнения Винера-Хопфа вида:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}q &= \int_0^\infty \int_0^\infty k(x-\xi, y-\eta) q(\xi, \eta) d\xi d\eta = f(x, y), \quad 0 \leq x \leq \infty, \quad 0 \leq y \leq \infty \\ k(x, y) &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{\Gamma_1} \int_{\Gamma_2} K(\alpha, \beta) e^{-i(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta, \quad Q(\alpha, \beta) = \int_0^\infty \int_0^\infty q(\xi, \eta) e^{i(\alpha \xi + \beta \eta)} d\xi d\eta \\ F(\alpha, \beta) &= \int_0^\infty \int_0^\infty f(\xi, \eta) e^{i(\alpha \xi + \beta \eta)} d\xi d\eta \end{aligned} \quad (1)$$

Решение уравнения (1), построенное в четверти плоскости, то есть для раствора сектора штампа $\nu = 90^\circ$, где ν – угол, измеряемый от оси ox против часовой стрелки, имеет вид (рис. 1):

$$\begin{aligned} q(x, y) &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{\Gamma_1} \int_{\Gamma_2} Q(\alpha, \beta) e^{-i(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta \\ Q(\alpha, \beta) &= K^{-1}F - \frac{1}{2} \left[K_{+\alpha}^{-1} \left\{ K_{-\alpha}^{-1} F \right\}_{-\alpha} + K_{+\beta}^{-1} \left\{ K_{-\beta}^{-1} F \right\}_{-\beta} + \right. \\ &\quad \left. + K_{+\alpha+\beta}^{-1} \left\{ K_{+\alpha-\beta}^{-1} \left\{ K_{-\alpha}^{-1} F \right\}_{+\alpha} \right\}_{-\beta} + K_{+\beta+\alpha}^{-1} \left\{ K_{+\beta-\alpha}^{-1} \left\{ K_{-\beta}^{-1} F \right\}_{+\beta} \right\}_{-\alpha} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

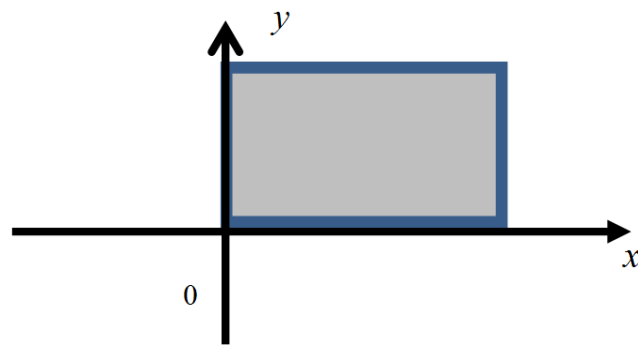


Рис. 1. Двумерное интегральное уравнение Винера-Хопфа описывает контактную задачу для штампа в форме первого квадранта /

Fig. 1. The two-dimensional Wiener-Hopf integral equation describes a contact problem for a stamp in the form of the first quadrant

Анализ построенного решения (2), после изучения, позволяет объяснить роль и свойство каждого его члена:

1). В решении, представленном формулой (2), первый справа член, после вычисления интеграла, формирует вырожденную составляющую решения, описывающую его поведение в зоне, дальней от границ четверти плоскости. Поэтому оно не содержит концентраций напряжений;

2). Второй и третий члены содержат граничные концентрации напряжений, возникающие на прямолинейных границах штампа, то есть на осях ox и oy . Они дают на прямолинейных границах штампа концентрации напряжений, описываемые функциями вида $x^{-1/2}$ и $y^{-1/2}$, хорошо известными в теории контактных задач;

3). Четвертый и пятый члены описывают концентрацию напряжений в угловой точке штампа. В работе [Бабешко и др., 2025] дан ее вид $q(x, y) = O(r^{-4})$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, то есть самая высокая концентрация напряжений.

В том случае, если сектор штампа увеличить, приняв $\nu = 180^\circ$, то границей штампа станет вся прямая ось ox и четвертый и пятый члены в формуле (2) исчезают. Возникает вопрос, имеются ли такие растворы секторов штампов, которые имеют концентрации контактных напряжений меньше, чем $x^{-1/2}$?

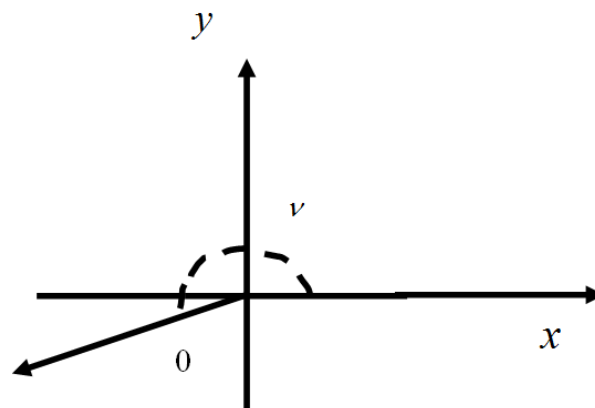


Рис. 2. Область, занятая штампом, с сектором тупого угла ν /

Fig. 2. The area occupied by the stamp, with a sector of an obtuse angle ν

В качестве пробных в работе рассматривались растворы секторов из диапазона $180^\circ \leq \nu \leq 270^\circ$ (рис. 2). Для исследования, рассматривались интегральные уравнения Винера-Хопфа в секторе раствора $\nu = 90^\circ$ (рис. 1) и взятые из сектора растворов с шагом $\nu = 10^\circ$ (рис. 2). Если было известно точное решение интегрального уравнения в первом секторе, то оно топологически гомеоморфно [Awrejcewicz et al., 2021; Athore et al., 2021; Fernandez et al., 2021; Goncalves et al., 2020; Huang et al., 2020; Pena, Rapun, 2020; Xavier et al., 2020] отображалось на секторы растворов $180^\circ \leq \nu \leq 270^\circ$. Это позволило построить точные решения интегрального уравнения в этих секторах $180^\circ \leq \nu \leq 270^\circ$ и вычислить концентрации напряжений по всей границе штампа. В результате исследования установлено, что на прямолинейных границах концентрация контактных напряжений описывается функциями $x^{-1/2}$ и $y^{-1/2}$, а в угловой точке для указанных значений параметра ν имеет значения, $q(x, y) = O(r^{-\lambda})$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, представленные в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

**Значения показателя концентрации контактных напряжений
в угловой точке штампа для растворов сектора штампа в градусах
с шагом $\nu = 10^\circ$ /**
**The values of the contact stress concentration index at the angular point
of the stamp for solutions of the stamp sector in degrees
increments**

ν°	180°	190°	200°	210°	220°	230°	240°	250°	260°	270°
λ	0.5	0.46	0.422	0.385	0.349	0.317	0.290	0.268	0.254	0.25

Результат исследования

В процессе исследования, получено представление распределения контактных напряжений под деформируемым штампом для растворов сектора штампа $180^\circ \leq \nu \leq 270^\circ$. Установлено, что в приграничных зонах деформируемого штампа происходит, при приближении к прямолинейной границе, нарастание контактных напряжений до уровня, описываемого функциями $x^{-1/2}$ и $y^{-1/2}$. Для выявления зоны понижения концентрации контактных напряжений, изучен случай штампа с указанным внутренним тупым углом. Штамп имеет раствор сектора, в который входят на плоскости два первых квадранта и часть третьего. В зоне излома границы штампа контактные напряжения имеют концентрацию контактных напряжений, описываемую функцией $q(x, y) = O(r^{-\lambda})$, $\lambda < 1/2$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, то есть наименьшей на всей границе перехода горной территории в равнинную. Вычисленные данные параметра λ представлены в таблице. Таким образом, эта зона является наименее опасной (рис. 3).

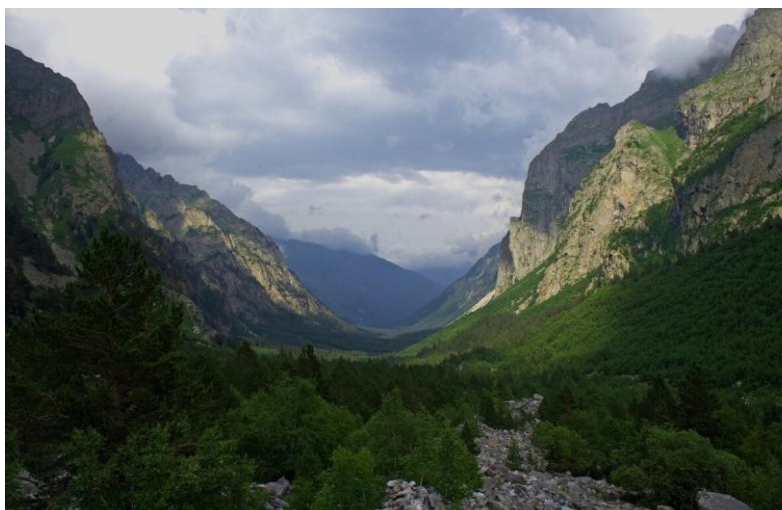


Рис. 3. Осетия. Цейское ущелье /

Fig. 3. Ossetia. Tseyskoe Gorge

Безопасность увеличивается по мере увеличения раствора сектора штампа, как представлено в таблице. Дальнейшее увеличение раствора сектора штампа может привести к встречному расположению границ ущелья, приближающемуся к параллельному [Бабешко и др., 2024]. Это может привести к резонансам И.И. Воровича и усугубить ситуацию.

Выводы

Разработанный метод решения двумерных интегральных уравнений Винера-Хопфа позволяет выявлять, при переходе горной территории в равнинную, как зоны повышенной сейсмической опасности, так и зоны пониженной. Они находятся в концах ущелий, берега которых формируют тупой угол (рис. 3).

Литература

1. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Евдокимов В.С., Зарецкая М.В., Хрипков Д.В. О предвестнике повышенной сейсмичности в области перехода горной территории в равнинную. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 1. – С. 45–55. DOI: 10.46698/VNC.2025.25.51.004.
2. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Уафа С.Б., Лозовой В.В., Евдокимов В.С. О предвестнике землетрясения в сейсмоопасной горной территории. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 33–44. DOI: 10.46698/VNC.2024.21.47.003.
3. Ворович И.И., Бабешко В.А. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М.: Наука, 1979. – 320 с.
4. Гамбурцев Г.А. Перспективный план исследований по проблеме «Изыскание и развитие прогноза землетрясений». // В сборнике: Развитие идей Г.А. Гамбурцева в геофизике. М.: Наука, 1982. – С. 304–311.
5. 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.
6. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. – 104 с.
7. Чернов Ю.К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической оценки территории. Ташкент: Фан, 1989. – 296 с.

8. Arhore E.G., Yasaei M., Dayyani I. Comparison of GA and topology optimization of adherend for adhesively bonded metal composite joints. // *International Journal of Solids and Structures*. – 2021. – Vols. 226–227. Art. No. 11107. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2021.111078.
9. Awrejcewicz J., Krysko V.A., Mitskievich S.A., Zhigalov M.V., Krysko A.V. Nonlinear dynamics of heterogeneous shells. Part 1: Statics and dynamics of heterogeneous variable stiffness shells. // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. – 2021. – Vol. 130. Art. No. 103669. DOI: 10.1016/j.nonlinmec.2021.103669.
10. 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.
11. Di Toro G., Han R., Hirose T., De Paola N., Nielsen S., Mizoguchi K., Ferri F., Cocco M., Shimamoto T. Fault lubrication during earthquake. // *Nature*. – 2011. – Vol. 471. Issue 7339. – pp. 494–498. DOI: 10.1038/nature09838.
12. Fernandez L., Novotny A.A., Prakash R., Sokołowski J. Pollution sources reconstruction based on the topological derivative method. // *Applied Mathematics and Optimization*. – 2021. – Vol. 84. – pp. 1493–152. DOI: 10.1007/s00245-020-09685-0.
13. Gonçalves J.F., Moreira J.B.D., Salas R.A. et al. Identification problem of acoustic media in the frequency domain based on the topology optimization method. // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2020. – Vol. 62. – pp. 1041–1059. DOI: 10.1007/s00158-020-02638-9.
14. Huang M., Lim X., Lei Y., Gu J. Structural damage identification based on modal frequency strain energy assurance criterion and flexibility using enhanced Moth-Flame optimization. // *Structures*. – 2020. – Vol. 28. – pp. 1119–1136. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.08.085.
15. Lu X., Lapusta N., Rosakis A.J. Pulse-like and crack-like ruptures in experiments mimicking crustal earthquakes. // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2007. – Vol. 104. Issue 48. – pp. 18931–18936.
16. 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.
17. 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.
18. Pena M., Rapun M.L. Application of the topological derivation to post-processing infrared time-harmonic thermograms for defect detection. // *Journal of Mathematics in Industry*. – 2020. – Vol. 10. DOI: 10.1186/s13362-020-0072-9.
19. Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: a physical basis. // *Science*. – 1973. – Vol. 181. No. 4102. – pp. 803–810.
20. Xavier M., Van Goethem N., Novotny A.A. Hydro-mechanical fracture modeling governed by the topological derivatives. // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2020. – Vol. 365. Art. No. 112974. DOI: 10.1016/j.cma.2020.112974.
21. Xia K., Rosakis A.J., Kanamori H. Laboratory Earthquakes: The Sub-Rayleigh-to-Supershear Rupture Transition. // *Science*. – 2004. – Vol. 303. – pp. 1859–1861.
22. 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., Evdokimov V.S., Zaretskaya M.V., Khripkov D.V. About the precursor of increased seismicity in the area of transition of the mountainous territory to the plain. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 1. pp. 54–55. DOI: 10.46698/VNC.2025.25.51.004. (In Russ.)

2. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Uafa S.B., Lozovoy V.V., Evdokimov V.S. About earthquake precursors in an earthquake-prone mountainous area. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024 Vol. 14. No. 2. pp. 33–44 DOI: 10.46698/VNC.2024.21.47.003. (In Russ.)
3. Vorovich I.I., Babeshko V.A. Dynamic mixed problems of elasticity theory for non-classical domains. Moscow. Nauka. 1979. 320 p. (In Russ.)
4. Gamburtsev G.A. Perspective plan of research on the problem Research and Development of Earthquake Forecast. In: Development of G.A. Gamburtsev's ideas in geophysics. Moscow. Nauka. 1982. pp. 304–311. (In Russ.)
5. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Gabaraev A.F., Merzlikin T.I. Nonlinear vibrations of the ground layer according to instrumental and numerical data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 70–82. DOI: 9.46698/VNC.2021.77.59.006. (In Russ.)
6. 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.)
7. Chernov Yu.K. Strong ground motions and quantitative seismic assessment of the territory. Tashkent. Fan. 1989. 296 p. (In Russ.)
8. Arhore E.G., Yasaee M., Dayyani I. Comparison of GA and topology optimization of adherend for adhesively bonded metal composite joints. *International Journal of Solids and Structures*. 2021. Vols. 226–227. Art. No. 11107. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2021.111078.
9. Awrejcewicz J., Krysko V.A., Mitskievich S.A., Zhigalov M.V., Krysko A.V. Nonlinear dynamics of heterogeneous shells. Part 1: Statics and dynamics of heterogeneous variable stiffness shells. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2021. Vol. 130. Art. No. 103669. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2021.103669.
10. 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.
11. Di Toro G., Han R., Hirose T., De Paola N., Nielsen S., Mizoguchi K., Ferri F., Cocco M., Shimamoto T. Fault lubrication during earthquake. *Nature*. 2011. Vol. 471. Issue 7339. pp. 494–498. DOI: 10.1038/nature09838.
12. Fernandez L., Novotny A.A., Prakash R., Sokołowski J. Pollution sources reconstruction based on the topological derivative method. *Applied Mathematics and Optimization*. 2021. Vol. 84. pp. 1493–152. DOI: 10.1007/s00245-020-09685-0.
13. Gonçalves J.F., Moreira J.B.D., Salas R.A. et al. Identification problem of acoustic media in the frequency domain based on the topology optimization method. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2020. Vol. 62. pp. 1041–1059. DOI: 10.1007/s00158-020-02638-9.
14. Huang M., Lim X., Lei Y., Gu J. Structural damage identification based on modal frequency strain energy assurance criterion and flexibility using enhanced Moth-Flame optimization. *Structures*. 2020. Vol. 28. pp. 1119–1136. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.08.085.
15. Lu X., Lapusta N., Rosakis A.J. Pulse-like and crack-like ruptures in experiments mimicking crustal earthquakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2007. Vol. 104. Issue 48. pp. 18931–18936.
16. 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.
17. 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.
18. Pena M., Rapun M.L. Application of the topological derivation to post-processing infrared time-harmonic thermograms for defect detection. *Journal of Mathematics in Industry*. 2020. Vol. 10. DOI: 10.1186/s13362-020-0072-9.

19. Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: a physical basis. *Science*. 1973. Vol. 181. No. 4102. pp. 803–810.
20. Xavier M., Van Goethem N., Novotny A.A. Hydro-mechanical fracture modeling governed by the topological derivatives. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2020. Vol. 365. Art. No. 112974. DOI: 10.1016/j.cma.2020.112974.
21. Xia K., Rosakis A.J., Kanamori H. Laboratory Earthquakes: The Sub-Rayleigh-to-Supershear Rupture Transition. *Science*. 2004. Vol. 303. pp. 1859–1861.
22. 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.

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2025.67.30.001

Оригинальная статья

Инверсионный характер кинематических обстановок сейсмогенеза Среднекаспийского региона

Ю.М. Вольфман[✉], Е.Я. Колесникова[✉], И.В. Калинин[✉]

Институт сейсмологии и геодинамики, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Россия, 295007, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4, e-mail: seism.volf@gmail.com

Статья поступила: 08.04.2025, доработана: 19.05.2025, принята к публикации: 22.05.2025

Резюме: Актуальность работы. Одним из проявлений геодинамической нестабильности сейсмоактивных регионов являются инверсии полей напряжений (от лат. *inversio* – переворачивание). Они находят отражение в фокальных механизмах землетрясений, которые формировались в противоположных кинематических обстановках в течение коротких промежутков времени. Изучение инверсионных изменений напряженно-деформированного состояния земной коры способствует формированию представлений о современной геодинамике сейсмоактивных регионов. **Цель исследований:** идентификация инверсионных обстановок сейсмогенеза Среднекаспийского региона и сравнительный пространственно-временной анализ их проявления в районах с разным геологическим строением. **Методы исследования.** В основу методики заложен алгоритм кинематического анализа данных о фокальных механизмах землетрясений, который предполагает разделение очагов землетрясений по кинематическим обстановкам их формирования (сжатия или растяжения) и исследование особенностей их пространственно-временного распределения. **Фактологической основой** послужили выборки данных по фокальным механизмам землетрясений из каталогов, размещенных на сайтах международных сейсмологических агентств, и из опубликованных региональных каталогов. **Результаты работы.** Обоснован инверсионный характер кинематических обстановок сейсмогенеза под воздействием периодически действующих напряжений юго-юго-западного–северо-северо-восточного сжатия и растяжения; построены стереографические модели этих обстановок. Инверсионные изменения происходили в течение коротких (менее 1-го года) промежутков времени. Обстановки сжатия и транспрессии в количественном и энергетическом отношении являются доминирующими: соответствующие им очаги локализованы, в основном, в континентальной части региона. Они являются прямыми индикаторами современных процессов орогенеза, взбросо- и надвигообразования в районах Большого Кавказа и Копетдага. В меньшей мере проявились обстановки растяжения и транстенсии. Они проявились в очагах землетрясений, сосредоточенных, в основном, в акватории Каспийского моря, на границе областей с корой континентального и субокеанического типа. Особенности локализации очагов этого типа являются прямым указанием на процессы деструкции в северном борту котловины с корой субокеанического типа – Южно-Каспийской впадины.

Ключевые слова: землетрясения, сейсмогенез, кинематические обстановки, инверсии, системы напряжений, оси сжатия (растяжения), фокальный механизм.

Благодарности: Работа выполнена в рамках научной темы FZEG-2024-0016 Министерства науки и высшего образования РФ.

Для цитирования: Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я., Калинин И.В. Инверсионный характер кинематических обстановок сейсмогенеза Среднекаспийского региона. *Геология и геофизика Юга России*. 15(2): 73-86. DOI: 10.46698/VNC.2025.67.30.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.67.30.001

Original paper

Inversion character of kinematic conditions of seismogenesis in the Middle Caspian region

Yu.M. Volfman^{ORCID}, E.Ya. Kolesnikova^{ORCID}, I.V. Kalinyuk^{ORCID}

Institute of Seismology and Geodynamics, V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
4 Vernadskogo Pr., Simferopol 295007, Russian Federation,
e-mail: seism.volf@gmail.com

Received: 08.04.2025, revised: 19.05.2025, accepted: 22.05.2025

Abstract: Relevance. One of the manifestations of geodynamic instability in seismically active regions is the inversion of stress fields (from Latin *inversio* – inversion). They are reflected in the focal mechanisms of earthquakes, which formed in opposite kinematic environments over short periods of time. The study of inversion changes in the stress-strain state of the Earth's crust contributes to the formation of ideas about the modern geodynamics of seismically active regions. **Aim.** Identification of the inversion conditions of the seismogenesis of the Middle Caspian region and comparative spatial and temporal analysis of their manifestation in areas with different geological structures. **Methods.** The methodology is based on an algorithm for the kinematic analysis of data on the focal earthquake mechanisms, which involves the separation of earthquake foci according to the kinematic conditions of their formation (compression or stretching) and the study of the features of their spatial and temporal distribution. **The factual basis** was the sampling of data on the focal mechanisms of earthquakes from catalogs posted on the websites of international seismological agencies and from published regional catalogs. **Results.** The inversion character of the kinematic conditions of seismogenesis under the influence of periodically acting stresses of south-south-west–north-north-east compression and stretching is substantiated; stereographic models of these conditions are constructed. The inversion changes occurred over short (less than 1 year) time intervals. The conditions of compression and transpression are dominant in terms of quantity and energy: their corresponding foci are localized mainly in the continental part of the region. They are direct indicators of modern processes of orogeny, uplift and thrust formation in the Greater Caucasus and Kopetdag regions. To a lesser extent, the conditions of stretching and transtension were manifested. They manifested themselves in earthquake foci concentrated mainly in the waters of the Caspian Sea, on the border of areas with the crust of the continental and suboceanic type. The localization features of foci of this type are a direct indication of the destruction processes in the northern side of a basin with a suboceanic type crust – the South Caspian Depression.

Keywords: earthquakes, seismogenesis, kinematic situations, inversions, stress systems, compression (stretching) axes, focal mechanism.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the scientific topic FZEG-2024-0016 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya., Kalinyuk I.V. Inversion character of kinematic conditions of seismogenesis in the Middle Caspian region. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 15(2): 73-86. DOI: 10.46698/VNC.2025.67.30.001

Введение

В ряде публикаций показано, что сейсмоактивные области представляют собой весьма динамичные геосистемы, в пределах которых кардинальные изменения напряженно-деформированного состояния геологической среды и, соответственно, условий формирования землетрясений происходят в течение коротких промежутков времени [Широкова, 1967; Гущенко, 1979; Газлийские ..., 1986; Юнга, 1996;

Степаненко и др., 2013; Volfman et al., 2017 и др.]. Эти изменения обуславливают многообразие проявления кинематических обстановок сейсмогенеза, отражающих воздействие полей напряжений сжатия или растяжения в регионе и особенности ориентировок их главных осей относительно сторон света.

Одним из проявлений геодинамической нестабильности регионов являются инверсии (от лат. *inversio* – «переворачивание») сейсмогенерирующих полей напряжений, которые находят отражение в фокальных механизмах землетрясений, возникших в противоположных кинематических обстановках [Гущенко, 1979; Газлийские ..., 1986; Вольфман, Колесникова, 2022].

Наличие короткопериодных импульсов сжатия и растяжения коры по данным фокальных механизмов землетрясений было обосновано О.И. Гущенко [Гущенко, 1979]. Явление инверсии кинематических обстановок установлено при реализации Газлийских землетрясений 1976–1984 годов, в очагах которых происходила переориентировка тензора напряжений от юго-юго-западного (8.04.1976 г.) до восточно-юго-восточного (19.03.1984 г.) сжатия [Газлийские ..., 1986]. Инверсионный характер сейсмогенеза отмечается не только в земной коре, но и в верхней мантии, например, в области Вранча [Степаненко и др., 2013; Volfman et al., 2017]. Даже в областях, считавшихся асейсмичными, в центре Украинского щита (г. Кривой Рог, Украина) произошли землетрясения в противоположных кинематических обстановках – субширотного (25.12.2007 г.) и субмеридионального (23.06.2013 г.) сжатия [Пустовитенко и др., 2009, 2014]. На геодинамическую нестабильность и наличие инверсионных изменений сейсмогенеза указывают и механизмы очагов землетрясений, произошедших в пределах Каспийского моря и смежных территорий.

Актуальность настоящей работы обусловлена тем обстоятельством, что представления о кинематике сейсмогенных зон (то есть, о типе и ориентировке напряжений, предопределивших особенности активизации последних), нередко находят отражение в прогностических моделях разного целевого назначения, влияя на выводы прогнозных исследований. При этом не учитываются инверсионные изменения напряженно-деформированного состояния среды и их роль в современной геодинамике сейсмоактивных регионов. Цель исследований: идентификация инверсионных кинематических обстановок сейсмогенеза Среднекаспийского региона и сравнительный пространственно-временной анализ их проявления в пределах геоструктур, характеризующихся разным строением.

Исходные данные и методы исследования

Основой анализа кинематических обстановок сейсмогенеза послужили выборки данных по фокальным механизмам землетрясений из сейсмических каталогов, размещенных на сайтах Международного сейсмологического центра ISC (<https://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/interactive>), ФИЦ Единая геофизическая служба РАН (<http://www.ceme.gsras.ru>), Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра (<http://www.emsc-csem.org>) и Global CMT (<https://www.globalcmt.org>). Также использованы данные о механизмах очагов, опубликованные в научной литературе [Заманова, 2014; Етирмишли и др., 2022 и др.].

Объем анализируемой выборки составил 134 фокальных механизма для землетрясений, локализованных на участке с координатами 38–44° с.ш. и 44–56° в.д. В выборку вошли все идентифицированные очаги с магнитудами от 2,2 до 7,0; при этом большая их часть (около 70%) имеет значения $M \geq 4,0$.

В основу методики исследований заложен алгоритм тектонофизического анализа данных, предполагающий разделение очагов по кинематическим обстановкам формирования (разноориентированного сжатия или растяжения) и исследование особенностей их пространственно-временного распределения.

Идентификация обстановок в очагах выполнена в соответствии с классификацией типов напряженного состояния геологической среды [Гущенко и др., 1991; Гинтов, 2005; Ребецкий и др., 2017]. Согласно этой классификации, при сжатии и транспрессии (горизонтальном сжатии со сдвигом) формировались очаги взбросового, сдвиго-взбросового и взбросо-сдвигового типов; их общее количество составило 58 событий (43% от исследуемой выборки). Обстановкам растяжения и транстенсии (горизонтального растяжения со сдвиговой составляющей) отвечают сбросовый, сдвиго-сбросовый и сбросо-сдвиговый типы, также имеющие широкое распространение – 46 землетрясений (34% от общего количества). Кроме того, выборка включает 30 очагов сдвигового типа, формирование которых равновероятно как в обстановках сжатия, так и в условиях растяжения земной коры. Поскольку значения основных параметров сдвиговых фокальных механизмов имеют существенный разброс, не позволяя выделить доминирующие системы напряжений, землетрясения данного типа в работе не анализировались.

Результаты исследований и их обсуждение

Доминирующие кинематические обстановки сейсмогенеза. Результаты анализа фокальных механизмов землетрясений Среднекаспийского региона отражают влияние разнообразных, быстроменяющихся полей напряжений на процессы сейсмогенеза. Для очагов, обусловленных обстановками сжатия или транспрессии, направление действия структурообразующих напряжений определяется по ориентировке оси максимального сжатия (P). Аналогичным образом, в обстановках растяжения и транстенсии критерием определения кинематической обстановки являются направления оси максимального растяжения (T). Соотношения ориентировок этих осей в фокальных механизмах соответствующих типов приведены на роза-диаграммах, построенных не в относительном (в % соотношении), а в реальном (по количеству очагов) масштабе (рис. 1).

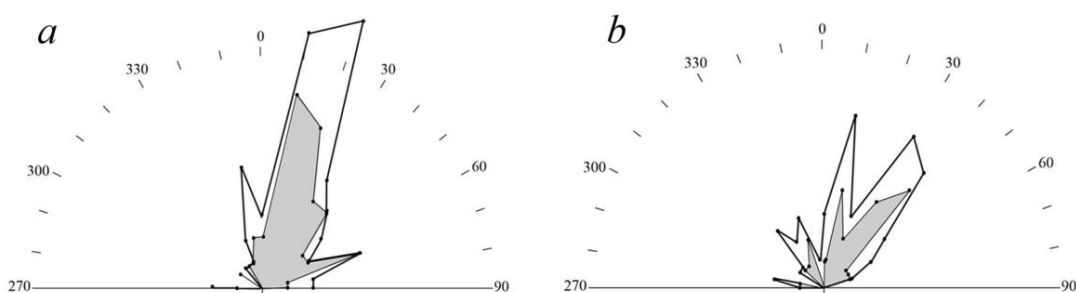


Рис. 1. Розы-диаграммы ориентировок осей максимального сжатия P (а) и максимального растяжения T (б) в фокальных механизмах землетрясений региона, сформировавшихся в обстановках, соответственно, сжатия и растяжения; контуром показаны все очаги данных обстановок, затенено – очаги только основных (взбросового и сбросового) типов /

Fig. 1. Roses-diagrams of the orientations of the axes of maximum compression P (a) and maximum elongation T (b) in the focal mechanisms of earthquakes in the region formed in conditions of compression and elongation, respectively; the contour shows all earthquake source of these situations, shaded – earthquake source of the main (reverse fault and normal fault) types

Анализ ориентировок осей сжатия в очагах взбросового типа показал, что значительное их количество (28, включая все события с $M \geq 6,0$) локализовано в диапазоне ориентировок $0-40^\circ$ с четко выраженным максимумом в направлении $10-20^\circ$ (на рис. 1а – затенено). Эта закономерность проявляется и в суммарном распределении осей P в очагах всех типов, отвечающих обстановкам сжатия и транспрессии: этому максимуму соответствуют значения параметров 41-го фокального механизма (на рис. 1а – показаны контуром).

Ориентировки осей растяжения в большинстве очагов сбросового типа (в 15-ти из 24-х, включая все землетрясения с $M \geq 6,0$) локализованы в том же диапазоне диаграммы, что и оси сжатия P взбросовых очагов – $10-40^\circ$, образуя при этом два выраженных максимума в направлениях 10° и $30-40^\circ$ (на рис. 1б – затенено). В суммарном распределении осей T в очагах сбросового, сбросо-сдвигового и сдвиго-сбросового типов, отвечающих обстановкам растяжения и транстенсии, указанные максимумы выглядят еще более выразительно: им соответствуют параметры 27-ми очагов (на рис. 1б – показаны контуром).

Таким образом, контрастные максимумы ($10-40^\circ$) ориентировок осей главных напряжений P и T (рис. 1) указывают на то, что формирование сейсмогенеза было обусловлено периодически сменяющимися друг друга (инверсионными) кинематическими обстановками сжатия и растяжения, действующими в ЮЮЗ–ССВ (близком к субмеридиональному) направлении.

Аналогичные обстановки ЮЮЗ–ССВ сжатия и растяжения преобладают и в очагах Средиземноморского пояса, в частности, в пределах его сегмента, протягивающегося от Пиренеев до Каспийского моря. Максимум ориентировок осей сжатия в очагах 464-х взбросовых землетрясений составляет $24 (204)^\circ$, а максимум осей растяжения в 557-и землетрясениях сбросового типа ориентирован в направлении $19 (199)^\circ$ (<https://www.globalcmt.org>).

Пространственные особенности проявления инверсионных обстановок. Землетрясения, формирование которых обусловлено воздействием ЮЮЗ–ССВ сжатия (41 событие, включая 28 очагов взбросового, 8 – сдвиго-взбросового и 5 – взбросо-сдвигового типов), локализованы в пределах 2-х зон северо-западного (общекавказского) простираения (рис. 2а).

Эти зоны трассируются с Кавказа (от Азербайджана, Дагестана) до Туркменистана, пересекая Каспийское море вдоль Апшеронско-Прибалханской зоны поднятий, разграничивающей Средне- и Южно-Каспийскую впадины. В тектоническом отношении эта область представляет собой зону сочленения гетерогенного фундамента Скифско-Туранской плиты и альпийской складчато-покровной системы Большого Кавказа–Копетдага [Международная ..., 2003; Глумов и др., 2004; Сенин и др., 2022; Senin et al., 2002; Свалова, 2019; Стогний, Стогний, 2023 и др.]. Согласно Базе данных активных разломов Евразии, здесь сконцентрировано наибольшее количество активных сейсмогенных структур, имеющих преимущественно общекавказское простираение [Zelenin et al., 2022].

Приблизительно в той же области (рис. 2б) локализованы землетрясения, обусловленные обстановками ЮЮЗ–ССВ растяжения (15 очагов сбросового, 9 – сбросо-сдвигового и 3 – сдвиго-сбросового типов, всего 27 событий). Повышенная концентрация очагов данных типов приходится на участки освоения нефтегазовых месторождений в акватории Каспийского моря (Нефтяные камни, Гонешли-Чираг-Азери и т.п.). Таким образом, некоторые землетрясения могут являться тех-

ногенно-индуцированными. Тем не менее, поскольку энергия техногенных событий, как правило, относительно невелика, данное обстоятельство не может существенно образом изменить представлений о характере естественной сейсмичности региона.

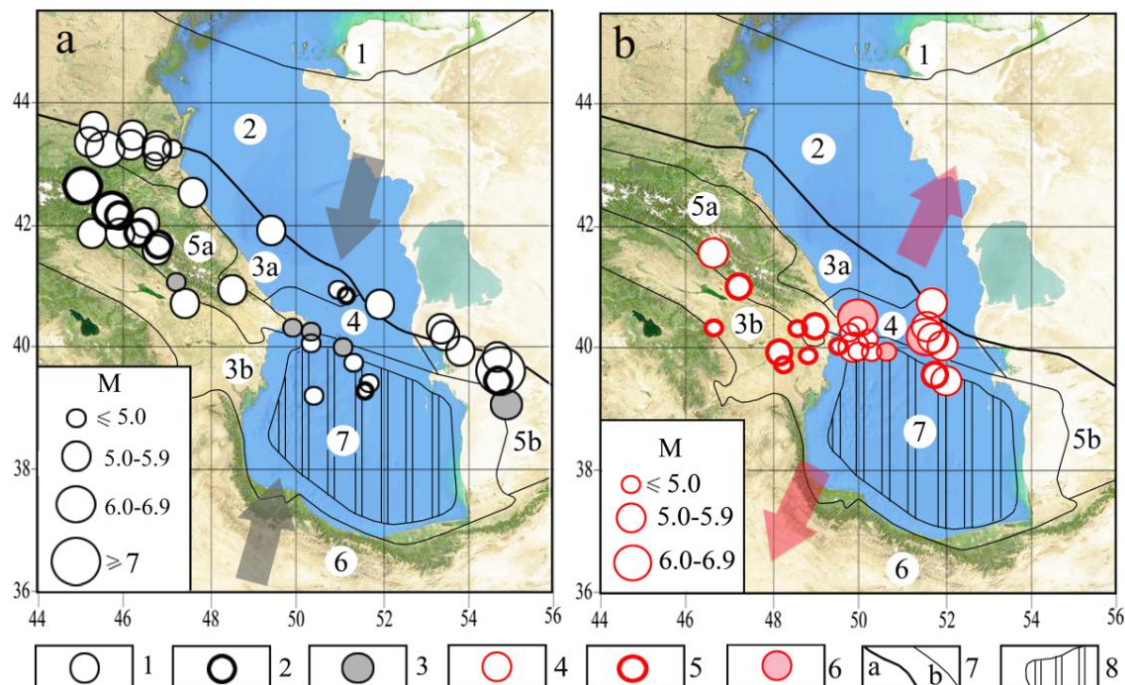


Рис. 2. Схемы размещения очагов землетрясений, сформированных в обстановках северо-северо-восточного (субмеридионального) сжатия (а) и растяжения (б). Условные обозначения:

1-3 – очаги взбросового (1), сдвига-взбросового (2) и взбросо-сдвигового (3) типов;
4-6 – очаги сбросового (4), сбросо-сдвигового (5) и сдвига-сбросового (6) типов;
7 – границы (а – между платформенными и складчатыми областями, б – между геоструктурами); 8 – кора субокеанического типа.

Цифрами обозначены: 1-2 – платформенные области: древняя Восточно-Европейская платформа (1), гетерогенная Скифско-Туранская плита (2); 3 – Терско-Каспийский передовой прогиб (3а) и межгорная Куринская впадина (3б); 4 – Апшероно-Прибалханская зона поднятий;
5-6 – альпийские складчатые системы Большого Кавказа (5а), Копетдага (5б), Малого Кавказа–Эльбурса (6); 7 – Южно-Каспийская впадина. Стрелки – направления действия регионального сжатия (серые) и растяжения (красные) /

Fig. 2. Schemes of earthquake foci formed in the conditions of north-northeastern (submeridional) compression (a) and stretching (b). Symbols: 1-3 – foci of reverse fault (1), reverse fault with shear (2) and shear with reverse fault (3) types; 4-6 – foci of normal fault (4), shear with normal fault (5) and normal fault with shear (6) types; 7 – boundaries (a – between platform and folded areas, b – between geostructures); 8 – crust of suboceanic type. The numbers indicate: 1-2 – platform areas: the ancient East European Platform (1), the heterogeneous Scythian-Turanian plate (2); 3 – the Tersk-Caspian advanced trough (3a) and the intermountain Kura depression (3b); 4 – the Absheron-Balkhanian uplift zone; 5-6 – the alpine folded systems of the Greater Caucasus (5a), Kopetdag (5b), Lesser Caucasus-Elbursa (6); 7 – South Caspian depression with reduced crust of suboceanic type. The arrows represent the directions of regional compression (gray) and stretching (red)

Стереографические модели инверсионных обстановок сейсмогенеза. Близкие значения параметров фокальных механизмов, обусловленных попеременно действующими в направлении 10-40° напряжениями сжатия и растяжения, позволяют построить соответствующие этим обстановкам стереографические модели регионального сейсмогенеза.

Первая модель – взбросового типа (рис. 3а) характеризует обстановки горизонтального сжатия с ориентировкой оси P в направлении 17° с углом наклона 3° . При этом ось T занимает вертикальное положение, а промежуточная ось N является горизонтальной ($106/0^\circ$ – азимут и угол падения). Нодальные плоскости ($NP1$ и $NP2$), отражающие вероятное положение сейсмогенных разрывов в очагах, имеют общекавказское (286°) простирание. Одна из них ($NP1$) в структурно-кинематическом отношении идентифицируется как взброс, имеющий наклон в южных румбах под углом 48° , вторая ($NP2$) – как надвиг, падающий под углом 42° в северном направлении. Учитывая общую тенденцию уменьшения глубин очагов в направлении с ЮЮЗ на ССВ, можно полагать, что положению реальных сейсмогенных разрывов в большей мере соответствует нодальная плоскость $NP2$, что в структурном отношении вполне отвечает геодинамической модели Большого Кавказа, построенной на основе реологической стратификации литосферы [Стогний, Стогний, 2024].

Вторая стереографическая модель – сбросового типа (рис. 3б), отражает обстановку ЮЮЗ–ССВ горизонтального растяжения с ориентировкой оси T в направлении $208/0^\circ$ при субвертикальной оси сжатия P и горизонтальном ($298^\circ/2^\circ$) положении промежуточной оси N . Нодальные плоскости ($NP1$ и $NP2$) так же, как и в первой модели, имеют общекавказское простирание (292 – 298°), однако в структурно-кинематическом отношении идентифицируются как сбросы, имеющие наклон в противоположных направлениях под углами 44 – 45° .

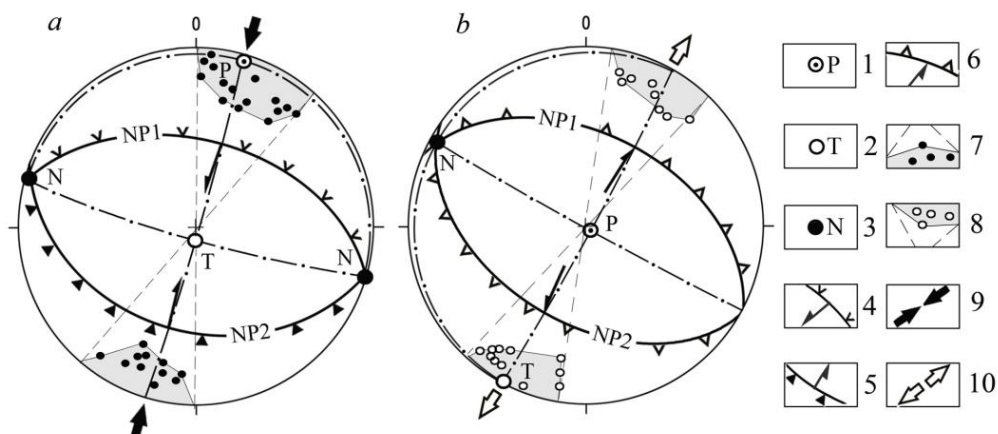


Рис. 3. Стереографические модели сейсмогенеза взбросового (а) и сбросового (б) типов для обстановок, соответственно, северо-северо-восточного (субмеридионального) сжатия и растяжения. Условные обозначения: 1-3 – проекции осей главных напряжений в моделях сейсмогенеза (1 – максимального сжатия, 2 – максимального растяжения, 3 – промежуточной); 4-6 – проекции нодальных плоскостей и их структурно-кинематическая характеристика (4 – взбросы, 5 – надвиги, 6 – сбросы), стрелки – направления перемещения висячего крыла; 7-8 – проекции осей главных напряжений в фокальных механизмах и сектора их локализации (7 – сжатия, 8 – растяжения); 9-10 – направления действия регионального сжатия (9) и растяжения (10) /

Fig. 3. Stereographic models of reverse fault (a) and normal fault (b) types of seismogenesis for north-northeastern (submeridional) compression and stretching, respectively. Symbols: 1-3 – projections of the axes of the main stresses in models of seismogenesis (1 – maximum compression, 2 – maximum tension, 3 – intermediate); 4-6 – projections of nodal planes and their structural and kinematic characteristics (4 – reverse faults, 5 – thrusts, 6 – normal faults), arrows – directions of movement of the upper wings; 7-8 – projections of the axes of the main stresses in the focal mechanisms and sectors of their localization (7 – compression, 8 – stretching); 9-10 – directions of action of regional compressions (9) and extensions (10) /

Сопоставление стереографических моделей регионального сейсмогенеза взбросового (рис. 3а) и сбросового (рис. 3б) типов, являющихся антиподами, указывает на практически полное совпадение границ секторов, соответственно, сжатия и растяжения в этих моделях. При этом расхождение ориентировок осей главных напряжений P и T , определяющих специфику кинематических обстановок, составляет всего 12° , отражая противоположный характер напряженно-деформированного состояния геологической среды.

Таким образом, основные кинематические обстановки, обусловившие формирование большей части землетрясений Среднекаспийского региона, отражают воздействие попеременно действующих напряжений ЮЮЗ–ССВ сжатия и растяжения. В процессе инверсии происходит замена взбросового режима в очагах на сбросовый; при этом положение оси P , определяющей направление сжатия, занимает ось T , указывая на растяжение в том же направлении (и наоборот). В обоих случаях теоретически наиболее предпочтительными для возникновения сейсмогенных разрывов являются одни и те же сегменты (сектора) земной коры, соответствующие направлениям действия максимальных касательных напряжений. При этом в обстановках сжатия сейсмогенные разрывы реализуются в виде взбросов и надвигов, при наличии растяжения – как сбросовые нарушения. Однако с учетом наличия внутреннего трения в горном массиве, реальная картина разрывообразования в очагах может оказаться более сложной: разрывы, формирование которых обусловлено обстановками растяжения (сбросы), могут иметь более крутые углы падения, в то время как часть разрывов, образующихся в обстановках сжатия, будет представлена относительно пологими надвигами.

Региональные особенности проявления инверсионных обстановок сейсмогенеза. Исследованы следующие аспекты инверсионного процесса в регионе:

1. Продолжительность действия каждой из инверсионных обстановок и длительность разделяющих их интервалов.
2. Соотношение суммарной сейсмической энергии, выделившейся в очагах землетрясений, отвечающих той или иной обстановке, и оценка энергетического вклада очагов каждого типа в процесс сейсмогенеза.
3. Особенности пространственного распределения этих землетрясений по отношению к основным геоструктурам региона.

Результаты исследований приведены в порядке их перечисления.

1. Особенности изменений во времени напряженно-деформированного состояния геологической среды и, соответственно, кинематических обстановок сейсмогенеза, отражает хронограмма ориентировок осей напряжений в очагах, образовавшихся в противоположных обстановках (см. рис. 4).

Она позволяет оценить как продолжительность периодов непрерывного действия каждой обстановки, так и длительность интервалов, разделяющих проявления этих обстановок. На хронограмме приведены все очаги, отвечающие обстановкам ЮЮЗ–ССВ сжатия (взбросовые, сдвиго-взбросовые, взбросо-сдвиговые – верхний ряд) и растяжения (сбросовые, сдвиго-сбросовые, сбросо-сдвиговые – нижний ряд), ориентировки осей напряжений P и T которых образуют максимумы в диапазоне $10\text{--}40^\circ$, показанные контуром на рисунке 1.

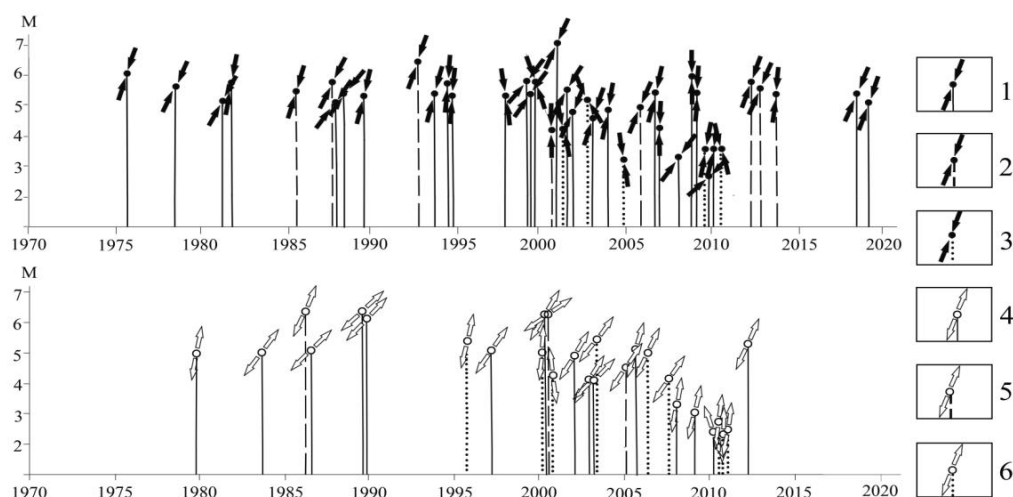


Рис. 4. Хронограмма проявления кинематических обстановок сейсмогенеза северо-северо-восточного (субмеридионального) сжатия (а) и растяжения (б) в пределах Среднекаспийского региона. Условные обозначения: 1-3 – очаги, сформированные в обстановках сжатия (1 – взбросового, 2 – сдвига-взбросового, 3 – взбросо-сдвигового типов); 4-6 – очаги, сформированные в обстановках растяжения (4 – сбросового, 5 – сдвига-сбросового, 6 – сбросо-сдвигового типов) /

Fig. 4. Chronogram of the manifestation of the kinematic conditions of the north-northeastern (submeridional) compression (a) and stretching (b) seismogenesis within the Middle Caspian region. Symbols: 1-3 – foci formed in compression environments (1 – reverse fault, 2 – reverse fault with shear, 3 – shear with reverse fault) types; 4-6 – foci formed in stretching environments (4 – normal fault, 5 – shear with normal fault, 6 – normal fault with shear types)

Кратковременность периодов проявления каждой из инверсионных обстановок сейсмогенеза, равно, как и длительность интервалов, разделяющих эти обстановки, обоснована сравнительными диаграммами, приведенными на рисунке 5. Эти временные параметры коррелируются между собой, имея максимумы протяженности от 0 до 5 и от 5 до 10 месяцев.

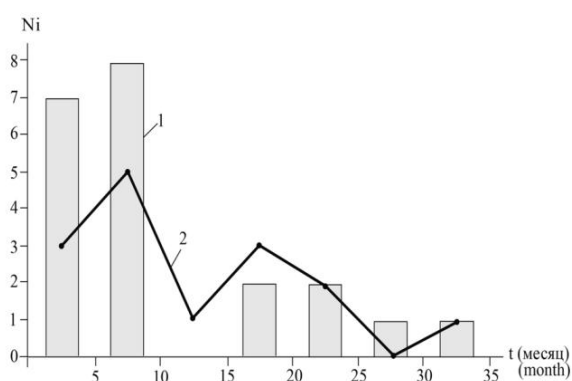


Рис. 5. Временные интервалы между проявлениями обстановок сжатия и растяжения (1) и продолжительность действия этих обстановок (2) /

Fig. 5. The time intervals between the manifestations of compression and stretching conditions (1) and the duration of these conditions (2)

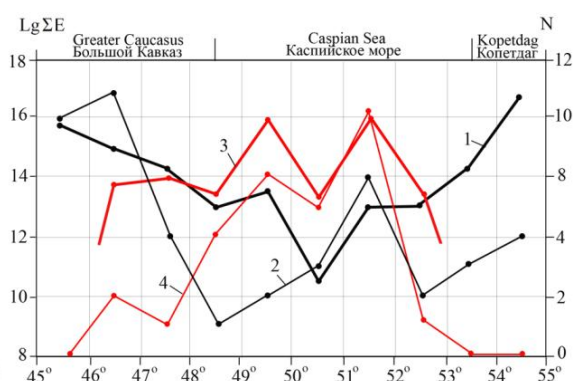


Рис. 6. Распределение (с запада на восток) величин логарифма суммарной выделенной энергии ($Lg\Sigma E$) и количества землетрясений (N) в очагах сжатия (1, 2) и растяжения (3, 4) /

Fig. 6. Distribution (from west to east) of the logarithm values of the total released energy ($Lg\Sigma E$) and the number of earthquakes (N) in the foci of compression (1, 2) and stretching (3, 4)

Таким образом, временной интервал между проявлениями противоположных кинематических обстановок, так же как и длительность периодов действия той или иной обстановки, большей частью, составляет менее 1-го года.

2. Инверсионным обстановкам сжатия и растяжения соответствует разное количество землетрясений (соответственно, 41 и 27 очагов), указывая на преобладающее влияние сжимающих напряжений на процесс регионального сейсмогенеза. Поскольку анализируемые события имеют разные магнитуды, для сравнительного анализа обстановок использован более универсальный показатель – примерное количество суммарной выделившейся энергии (ΣE , Дж) в очагах того или иного вида. Расчеты показывают, что и в данном случае сохраняется аналогичное соотношение: в обстановках сжатия этот показатель составляет $\Sigma E = 46,0 \cdot 10^{15}$ Дж (около 58% от общего количества энергии в 134-х очагах анализируемой выборки), тогда как при растяжении выделилось $\Sigma E = 20,1 \cdot 10^{15}$ Дж (более 25%).

Следует отметить неравноценный энергетический вклад очагов разных типов, сформированных в условиях, с одной стороны, прямого сжатия и растяжения, с другой – при транспрессии или транстенсии, т.е. при наличии сдвиговой составляющей. Так, в первом случае основная энергетическая нагрузка приходится на очаги взбросового типа, образовавшиеся в условиях прямого сжатия, составляя $42,2 \cdot 10^{15}$ Дж (92% от суммарной энергии обстановок инверсионного сжатия). При транспрессии эта величина существенно меньше: в очагах сдвиго-взбросового типа она составляет $3,8 \cdot 10^{15}$ Дж (~8%), взбросо-сдвигового – всего $0,02 \cdot 10^{15}$ Дж (<<1%). Сходная картина (в несколько иных соотношениях) характеризует и обстановки регионального растяжения и транстенсии: в очагах сбросового типа выделено более половины суммарной энергии – $11,6 \cdot 10^{15}$ Дж (58% от суммарной энергии инверсионных обстановок растяжения), сдвиго-сбросового – $8,3 \cdot 10^{15}$ Дж (41%) и сбросо-сдвигового – $0,2 \cdot 10^{15}$ Дж (~1%). Таким образом, основная роль в инверсионном процессе регионального сейсмогенеза принадлежит землетрясениям с очагами взбросового и сбросового типов.

3. Исследуемые землетрясения образуют зоны северо-западной ориентировки, приуроченные к форланду и к тыльной части складчатой системы Большого Кавказа-Копетдага (рис. 2). В акватории Каспийского моря очаги пространственно тяготеют к области Апшеронско-Прибалханской зоны поднятий, которая разграничивает Средне- и Южно-Каспийскую впадины (основание последней представлено корой субокеанического типа). При этом устанавливается поперечная (к простиранию этих геоструктур) зональность, выраженная количественно-энергетическими соотношениями очагов разных типов, отвечающих каждой из инверсионных обстановок (рис. 6).

Так, в пределах суши, а именно в районах Большого Кавказа и Копетдага, локализованы, главным образом, землетрясения, отвечающие обстановкам регионального сжатия. При этом они имеют более высокие значения магнитуд по сравнению с относительно малочисленными однотипными очагами, локализованными в акватории Каспийского моря (рис. 2а).

В то же время, большинство землетрясений (в том числе наиболее интенсивных, с высокими значениями магнитуд), обусловленных обстановками растяжения, локализовано в пределах акватории и пространственно тяготеет к Апшеронско-Прибалханской зоне поднятий, разграничивающей области с корой континентального и субокеанического типа. В меньшем количестве очаги растяжения распространены

в районе Большого Кавказа, а на восточном берегу Каспийского моря (в Копетдаге) их наличия не установлено (рис. 2б).

Эта тенденция отчетливо проявляется в латеральном распределении (с запада на восток) количества очагов, сформировавшихся в обстановках сжатия и растяжения, и логарифма суммарной выделившейся энергии в этих очагах. Данные, рассчитанные для сегментов, заключенных между целночисленными значениями меридианов (то есть, с шагом 1°), приведены на рисунке 6. Эти графики отражают существенное уменьшение сейсмической энергии и количества очагов, сформированных в обстановках сжатия, по направлению к Каспийскому морю как со стороны Большого Кавказа, так и со стороны Копетдага. В то же время, в распределении количества и энергии очагов, отвечающих региональному растяжению, наблюдается обратная тенденция: их максимумы приходятся на акваторию Каспийского моря, а именно – на Апшеронско-Прибалханскую зону поднятий, разграничивающую области с корой континентального и субокеанического типа (рис. 6). При этом на краях профиля, на удалении от акваториальной части, очаги, образованные в обстановках растяжения, отсутствуют.

Выводы

Таким образом, основные выводы относительно доминирующих обстановок сейсмогенеза в пределах Среднекаспийского региона сводятся к следующему:

1. Формирование регионального сейсмогенеза обусловлено, в основном, периодически сменяющими друг друга инверсионными обстановками сжатия и растяжения, действующими в ЮЮЗ–ССВ направлении; при этом их изменения происходили в течение коротких (менее 1-го года) временных интервалов.

2. Очаги землетрясений, возникшие в обстановках сжатия, локализованы, в основном, в континентальной части региона; они являются индикаторами современных процессов орогенеза, взбросо- и надвигообразования в районах Большого Кавказа и Копетдага.

3. Землетрясения обстановок растяжения доминируют в пределах акватории Каспийского моря. Местоположение, количество и энергетические характеристики этих очагов являются прямым указанием на современные процессы деструкции в северном борту котловины с корой субокеанического типа – Южно-Каспийской впадины.

Литература

1. Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я. Инверсии сейсмогенерирующих полей напряжений как проявление геодинамической неустойчивости Крымско-Черноморского региона. // Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология. – 2022. – Т. 8(74). № 4. – С. 207–218.
2. Газлийские землетрясения 1976 и 1984гг. Ташкент: Фан, 1986. – 368 с.
3. Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: Феникс, 2005. – 572 с.
4. Глумов И.Ф., Маловицкий Я.П., Новиков А.А., Сенин Б.В. Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря. М.: Недра-Бизнесцентр, 2004. – 342 с.
5. Гущенко О.И. Реконструкция поля мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей Евразии. // В сборнике статей: Поля напряжений и деформаций в литосфере. / Отв. редакторы А.С. Григорьев, Д.Н. Осокина. – М.: Наука, 1979. – С. 26–51.
6. Гущенко О.И., Мострюков А.О., Петров В.А. Структура поля современного регио-

нального напряжения сейсмоактивных зон земной коры восточной части Средиземноморского активного пояса. // Доклады академии наук СССР. – 1991. – Т. 312. № 4. – С. 830–835.

7. Етирмишли Г.Д., Казымова С.Э., Исмаилова С.С., Казымов И.Э. Современная геодинамика и сейсмичность Азербайджанского сектора Каспийского моря. // SOCAR Proceedings. – 2022. – № 4 – С. 8–16.

8. Заманова А.Г. Структура субдукционной зоны Южно-Каспийской впадины и сейсмичность. // Геофизический журнал. – 2014. – Т. 36. № 6. – С. 188–196.

9. Международная тектоническая карта Каспийского моря и его обрамления. Масштаб 1:2500000. Институт литосферы окраинных и внутренних морей РАН. Объяснительная записка. / Под редакцией В.Е. Хаина, Н.А. Богданова. – М.: Научный мир, 2003. – 120 с.

10. Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Мержей Е.А. Процессы в очаговой зоне Криворожского-III землетрясения 23 июня 2013 г. (Украина). // Сейсмологический бюллетень Украины за 2013 г. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2014. – С. 54–60.

11. Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Капитанова С.А. Процессы в очаговой зоне Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. // Сейсмологический бюллетень Украины за 2007 год. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2009. – С. 17–22.

12. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. – 234 с.

13. Свалова В.Б. Геотермия и сейсмичность Кавказского региона и обратная задача геодинамики. // Геология и Геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 3. – С. 77–93.

14. Сенин Б.В., Керимов В.Ю., Мустаев Р.Н., Леончик М.И. Структурно-геодинамические системы фундамента Черноморско-Каспийского региона и их эволюция в позднем палеозое-кайнозое. // Геотектоника. – 2022. – № 1. – С. 27–50.

15. Степаненко Н.Я., Симонова Н.А., Карданец В.Ю. Пространственные вариации осей главных напряжений в очагах землетрясений области Вранча. Сейсмологический бюллетень Украины за 2012 г. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2013. – С. 46–56.

16. Стогний В.В., Стогний Г.А. Глубинное строение и реологическая стратификация земной коры Центрального сегмента Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 6–20.

17. Стогний Г.А., Стогний В.В. Южная граница Скифской плиты в системе блоковой делимости консолидированной коры Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 6–18.

18. Широкова Е.И. Общие закономерности в ориентации главных напряжений в очагах землетрясений Средиземноморско-Азиатского сейсмического пояса. // Физика Земли. – 1967. – № 16. – С. 22–36.

19. Щукин Ю.К., Шебалин Н.В. Атлас глубинного строения очаговых зон землетрясений. / Отв. редактор А.А. Маловичко. – Воронеж: Научная книга, 2016. – 102 с.

20. Юнга С.Л. Сейсмотектонические деформации и напряжения в складчатых поясах неотектонической активизации Северной Евразии. // Физика Земли. – 1996. – № 12. – С. 37–58.

21. Senin B.V., Shainurov P.B., Ustiantsev V.L. Structural geology of the Northern and Middle Caspian on the basis of geological interpretation of geophysical data. // In: International conference on petroleum geology and hydrocarbon potential of the Black and Caspian sea. Baku. Abstracts Book. – 2002. – pp. 415–420.

22. Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya., Pustovitenko B.G., Milyukov V.K. Selective manifestation of tectogenic stress field within the Mediterranean belt (based on earthquake focal mechanism solutions). // Journal of Volcanology and Seismology. – 2017. – Vol. 11. No. 6. – pp. 447–461.

23. Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The active faults of Eurasia database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset. // Earth System Science Data. – 2022. – Vol. 14. – pp. 4489–4503.

References

1. Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya. Inversions of seismic-generating stress fields as a manifestation of geodynamic instability of the Crimean-Black Sea region. *Scientific Notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*. 2022. Vol. 8(74). No. 4. pp. 207–218. (In Russ.)
2. The Gazli earthquakes of 1976 and 1984. Tashkent. Fan. 1986. 368 p. (In Russ.)
3. Gintov O.B. Field tectonophysics and its application in the study of deformations of the Earth's crust of Ukraine. Kiev. Feniks. 2005. 572 p. (In Russ.)
4. Glumov I.F., Malovitsky Ya.P., Novikov A.A., Senin B.V. Regional geology and oil and gas content of the Caspian Sea. Moscow. Nedra-Business Center. 2004. 342 p. (In Russ.)
5. Gushchenko O.I. Reconstruction of megaregional tectonic stress field of seismically active regions of Eurasia. In: *Stress and strain fields in the lithosphere*. Eds. A.S. Grigoriev, D.N. Oso-kina. Moscow. Nauka. 1979. pp. 26–51. (In Russ.)
6. Gushchenko O.I., Mostryukov A.O., Petrov V.A. Structure of the modern regional stress field of seismically active zones of the Earth's crust in the eastern part of the Mediterranean active belt. *Doklady Earth Sciences USSR*. 1991. Vol. 312. No. 4. pp. 830–835. (In Russ.)
7. Yetirmishli G.J., Kazimova S.E., Ismailova S.S., Kazimov I.E. Modern geodynamics and seismicity of the Azerbaijan sector of the Caspian Sea. *SOCAR Proceedings*. 2022. No. 4. pp. 8–16. (In Russ.)
8. Zamanova A.G. Structure of the subduction zone of the South Caspian depression and seismicity. *Geophysical Journal*. 2014. Vol. 36. No. 6. pp. 188–196. (In Russ.)
9. International tectonic map of the Caspian Sea and its envelope. Scale 1:2500000. Institute of lithosphere of marginal and inland seas RAS. Explanatory note. Eds. V.E. Khain, N.A. Bogdanov. Moscow. Nauchnyi Mir. 2003. 120 p. (In Russ.)
10. Pustovitenko B.G., Pustovitenko A.A., Merzhay E.A. Processes in the source zone of the Krivorozhskoe-III earthquake on 23 June 2013 (Ukraine). *Seismological Bulletin of Ukraine for 2013. Sevastopol. ECOSI-Hydrophysics*. 2014. pp. 54–60. (In Russ.)
11. Pustovitenko B.G., Pustovitenko A.A., Kapitanova S.A. Processes in the source zone of the Krivorozhskoe earthquake on 25 December 2007. *Seismological Bulletin of Ukraine for 2007. Sevastopol. ECOSI-Hydrophysics*. 2009. p. 17–22. (In Russ.)
12. Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V. From slip mirrors to tectonic stresses. *Methods and Algorithms*. Moscow. GEOS. 2017. 234 p. (In Russ.)
13. Svalova V.B. Geothermics and seismicity of the Caucasus region and inverse problem of geodynamics. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 77–93. (In Russ.)
14. Senin B.V., Kerimov V.Yu., Mustaev R.N., Leonchik M.I. Structural-geodynamic systems of the basement of the Black Sea-Caspian region and their evolution in the late paleozoic-cenozoic. *Geotectonics*. 2022. No. 1. pp. 27–50. (In Russ.)
15. Stepanenko N.Ya., Simonova N.A., Kardanets V.Yu. Spatial variations of principal stress axes in the Vrancea region earthquake sources. *Seismological Bulletin of Ukraine for 2012. Sevastopol. ECOSI-Hydrophysics*. 2013. pp. 46–56. (In Russ.)
16. Stogny V.V., Stogny G.A. Deep structure and rheological stratification of the earth's crust of the Central segment of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 6–22. (In Russ.)
17. Stogny G.A., Stogny V.V. Southern boundary of the Scythian plate in the system of block divisibility of the consolidated crust of the Central and Eastern segments of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 6–18. (In Russ.)
18. Shirokova E.I. Common patterns in the orientation of principal stresses in earthquake sources of the Mediterranean-Asian seismic belt. *Physics of the Earth*. 1967. No. 16. pp. 22–36. (In Russ.)

19. Shchukin Yu.K., Shebalin N.V. Atlas of depth structure of earthquake source zones. Ed. A.A. Malovichko. Voronezh. Nauchnaya Kniga. 2016. 102 p. (In Russ.)
20. Yunga S.L. Seismotectonic deformations and stresses in fold belts of neotectonic activation of Northern Eurasia. *Physics of the Earth*. 1996. No. 12. pp. 37–58. (In Russ.)
21. Senin B.V., Shainurov P.B., Ustiantsev V.L. Structural geology of the Northern and Middle Caspian on the basis of geological interpretation of geophysical data In: International conference on petroleum geology and hydrocarbon potential of the Black and Caspian sea. Baku. Abstracts Book. 2002. pp. 415–420.
22. Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya., Pustovitenko B.G., Milyukov V.K. Selective Manifestation of seismogenic stress field within the Mediterranean belt (based on earthquake focal mechanism solutions). *Journal of Volcanology and Seismology*. 2017. Vol. 11. No. 6. pp. 447–461.
23. Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The active faults of Eurasia database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset. *Earth System Science Data*. 2022. Vol. 14. pp. 4489–4503.

УДК 550.34,550.21,534.11

DOI: 10.46698/VNC.2025.56.55.001

Оригинальная статья

Исследование глубинного строения и тектоники северного склона Большого Кавказа и западной части Терско-Каспийского прогиба по результатам микросейсмического зондирования

А.В. Горбатиков¹, В.Б. Заалишвили², Ю.В. Харазова¹,
М.Ю. Степанова¹, Н.Г. Кошевой¹, Н.В. Андреева¹, А.А. Цуканов¹,
Г.В. Шманатов², Т.И. Мерзликин²

¹ Институт физики земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва,
ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1, e-mail: avgor70@mail.ru;

² Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002,
г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а

Статья поступила: 01.05.2025, доработана: 05.06.2025, принята к публикации: 09.06.2025

Резюме: Актуальность работы обусловлена необходимостью исследования особенностей геодинамических процессов, формирующих структуры в пределах сложнопостроенного региона, включающего северное крыло Большого Кавказа и внутренние хребты Терско-Каспийской впадины. **Методы.** С целью изучения этих процессов выполнено сопоставление морфологических особенностей различных горных построек региона с их глубинным строением, полученным по методу микросейсмического зондирования (ММЗ). **Результаты.** Пройден региональный профиль от северного склона Большого Кавказа через Осетинскую впадину, Назрановский выступ, Сунженский и Терский хребты общей длиной 115 км с пространственным шагом между пунктами измерений 500–750 м. Построен разрез до глубины 45 км. Обнаружены крупные низкоскоростные аномалии под северным склоном Большого Кавказа и Назрановским поднятием. Аналогичная аномалия под северным склоном Кавказа в районе реки Ардон предполагает, что вдоль всего северного склона Большого Кавказа присутствует стенообразное низкоскоростное тело, пространственно коррелирующее с резким подъемом рельефа при продвижении от предгорной впадины в сторону горного массива. Это тело с высоким электрическим сопротивлением по данным магнитотеллурического зондирования (МТЗ) простирается на глубину 50–60 км. Его можно интерпретировать как зону, связанную с тепловыми потоками и наличием флюида в изолированных микротрещинах. Сунженский и Терский хребты не имеют подобных глубинных аномалий. Их строение отличается от северного склона Большого Кавказа, а генезис связан с горизонтальным сжатием и складчато-надвиговыми деформациями в осадочном чехле. На основании сопоставления структуры осадочного чехла по данным ММЗ с возрастом начала тектонической активизации Сунженского хребта рассчитана средняя скорость вертикальных движений, составившая ~0.83 мм/год, также оценена средняя скорость денудации ~0.22 мм/год, что составляет ~25% от скорости роста и согласуется с современными оценками для горных систем Кавказа.

Ключевые слова: глубинное строение, микросейсмическое зондирование, скорость роста и денудации, Большой Кавказ, Сунженский хребет, Терский хребет, Назрановское поднятие.

Благодарности: Авторы с благодарностью вспоминают ушедшего из жизни Е.А. Рогожина, который был инициатором и вдохновителем данного исследования. Авторы выражают признательность директору Единой геофизической службы РАН Ю.А. Виноградову и заместителю директора ЕГС РАН Р.А. Дягилеву за предоставление доступа к записям широкополосных сейсмических станций ЕГС РАН, установленных в регионе исследований. Работа выполнена в рамках государственного задания FMWU-2025-0047 Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

Для цитирования: Горбати́ков А.В., Заалишвили В.Б., Харазова Ю.В., Степанова М.Ю., Кошевой Н.Г., Андреева Н.В., Цуканов А.А., Шманатов Г.В., Мерзликин Т.И. Исследование глубинного строения и тектоники северного склона Большого Кавказа и западной части Терско-Каспийского прогиба по результатам микросейсмического зондирования. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 87-102. DOI: 10.46698/VNC.2025.56.55.001

GEOPHYSICS

DOI: 10.46698/VNC.2025.56.55.001

Original paper

Study of the deep structure and tectonics of the northern slope of the Greater Caucasus and the western part of the Terek-Caspian depression based on the results of microseismic sounding

A.V. Gorbatikov¹, V.B. Zaalishvili², Yu.V. Kharazova¹, M.Yu. Stepanova¹,
N.G. Koshevoy¹, N.V. Andreeva¹, A.A. Tsukanov¹, G.V. Shmanatov²,
T.I. Merzlikin²

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
10/1 B. Gruzinskaya, Moscow 123995, Russian Federation,
e-mail: avgor70@mail.ru;

² Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation

Received: 01.05.2025, revised: 05.06.2025, accepted: 09.06.2025

Abstract: Relevance. The relevance of this work is determined by the need to study the peculiarities of geodynamic processes that form structures within a complex region, including the northern wing of the Greater Caucasus and the internal ridges of the Terek-Caspian depression. **Methods.** To study these processes, a comparison was made between the morphological features of various mountain structures in the region and their deep structure obtained by the microseismic sounding method (MSM). The results of other methods were used for comparison. A regional profile was surveyed, extending from the northern slope of the Greater Caucasus through the Ossetian depression, the Nazran protrusion, and the Sunzha and Terek ridges, with a total length of 115 km and a spatial step between measurement points of 500-750 m. A section was constructed to a depth of 45 km. **Results.** Large low-velocity anomalies were detected beneath the northern slope of the Greater Caucasus and the Nazran Uplift. A similar anomaly under the northern slope of the Caucasus in the Ardon River area suggests that there is a wall-shaped low-velocity body along the entire northern slope of the Greater Caucasus, correlating in its spatial position with a sharp rise in relief from the foothill depression towards the mountain massif. According to magnetotelluric sounding (MTS) data, this body with high electrical resistance extends to a depth of 50–60 km. It can be interpreted as a zone associated with heat flows and the presence of fluid in isolated microcracks. The Sunzha and Terek ridges do not have similar deep anomalies. Their structure differs from that of the northern slope of the Greater Caucasus, and their genesis is associated with horizontal compression and fold-and-thrust deformations in the sedimentary cover. Based on a comparison of the structure of the sedimentary cover according to MSM data with the age of the onset of tectonic activation of the Sunzha Ridge, the average vertical movement rate was calculated to be ~0.83 mm/year, and the average denudation rate was estimated to be ~0.22 mm/year, which is ~25% of the growth rate and is consistent with modern estimates for mountain systems in the Caucasus.

Keywords: deep structure, microseismic sounding, growth and denudation rates, Greater Caucasus, Sunzha Range, Terek Range, Nazran Uplift.

Acknowledgements: The authors gratefully remember E.A. Rogozhin, who passed away and was the initiator and inspirer of this study. The authors express their gratitude to Y.A. Vinogradov, Director of the Geophysical

Survey of the Russian Academy of Sciences, and R.A. Dyagilev, Deputy Director of the Unified Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, for providing access to the records of broadband seismic stations of the Unified Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences installed in the study region. The work was carried out within the framework of the state assignment FMWU-2025-0047 of the Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences.

For citation: Gorbatiykov A.V., Zaalishvili V.B., Kharazova Yu.V., Stepanova M.Yu, Koshevoy N.G., Andreeva N.V., Tsukanov A.A., Shmanatov G.V., Merzlikin T.I. Study of the deep structure and tectonics of the northern slope of the Greater Caucasus and the western part of the Terek-Caspian depression based on the results of microseismic sounding. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 87–102. DOI: 10.46698/VNC.2025.56.55.001

Введение

Исследование глубинного строения в контактных зонах литосферных блоков в сопоставлении с сейсмичностью и регистрируемыми современными движениями помогает понять развитие геодинамических процессов в регионе. Строение Большого Кавказа, Осетинской впадины, Сунженского и Терского хребтов на территории Северной Осетии изучалось в течение ряда лет с использованием различных геофизических методов: ГСЗ, МОВ ОГТ, МОВЗ, МТЗ, сейсмической томографии и пр. [Краснопевцева и др., 1970; Летавин и др., 1975; Коновалов и др., 1987; Шемпелев, 2008; Zabelina et al., 2016; Rogozhin et al., 2019; Ismail-Zadeh et al., 2020; Стогний и др., 2022, 2023; Цибизова и др., 2023]. Так, по профилю ГСЗ Степное-Бакуриани [Краснопевцева и др., 1970] были получены глубинные границы Мохоровичича, Конрада, поверхность «гранитного» слоя, преломляющая граница, которая в северной части Предкавказья соответствует поверхности палеозойского фундамента. В Осетинской впадине эта граница близка к поверхности подсолевых верхнеюрских или нижне-среднеюрских терригенных отложений. Также по данным МОВ ОГТ были выделены разломы в кровле меловых отложений.

В последние десятилетия набор методов дополнился методом микросейсмического зондирования (ММЗ). С помощью ММЗ в Осетинском секторе Большого Кавказа вдоль Ардонского профиля установлено наличие двух характерных по свойствам и морфологии глубинных объемов под горной системой [Gorbatiykov et al., 2015]. Крупный низкоскоростной объем расположен под северным крылом и осевой частью мегантиклинория Большого Кавказа, а высокоскоростной – под южным. Практически под всей структурой глыбовой части северного крыла Кавказа низкоскоростной объем имеет выдержанную горизонтальную кровлю на глубине ~10 км. Корень низкоскоростной области уходит на глубины ~50–60 км. Заметна довольно отчетливая приуроченность слабой региональной сейсмичности к высокоскоростной области. В диапазоне глубин 10–25 км слабая сейсмичность резко спадает в пределах этой низкоскоростной области. По независимым данным МТЗ электрическое сопротивление низкоскоростной области заметно превышает сопротивление вмещающих пород [Шемпелев, 2008].

На базе применения ММЗ ранее была предложена кинематическая схема тектонических движений, которая позволяет объяснить наличие в тектонической зоне северной моноклинали Кавказа серии падающих на север надвигов и взбросов [Горбатиюков и др., 2023]. В работе предполагается, что в зоне коллизии складчато-глыбового горного сооружения Кавказа и Скифской плиты верхняя осадочная толща надвигается на Кавказ быстрее, проскальзывая по контакту фундамент-осадки. Этот сдвиг объясняет приуроченность гипоцентров землетрясений к глубинам 8–11 км. В районе Вла-

дикавказского разлома при столкновении осадочной толщи с консолидированным приподнятым массивом Кавказа происходит процесс ее выпучивания, вследствие чего образуется листрика Владикавказского разлома, а Сунженский хребет является промежуточной антиклинальной складкой, формируемой в этой толще.

В приведенном исследовании профиль ММЗ, проходя вдоль участка русла реки Терек, пересекал Сунженский хребет в районе Эльхотовских ворот. Это позволило подтвердить наличие разломной структуры в этой части хребта. Однако выявленный при этом яркий разлом замаскировал в разрезе глубинное строение самого хребта.

Более детальное изучение глубинного строения Сунженского хребта явилось задачей нашего дальнейшего исследования. Внимание также привлекла проблема взаимного сопоставления структур Сунженского хребта и Назрановского выступа. С одной стороны, Назрановский выступ является отрогом Большого Кавказа, но с другой стороны, он непосредственно примыкает к Сунженскому хребту.

Наконец, в развитие ранее полученных результатов интересно было также выяснить, обнаруживается ли низкоскоростное тело под Большим Кавказом при пересечении его северного склона по ущелью Терека (аналогично пересечению по Ардонскому ущелью).

Таким образом, цель работы состояла в выполнении еще одного регионального профиля ММЗ от северного склона Большого Кавказа через Осетинскую впадину, Назрановский выступ, Сунженский и Терский хребты и определении глубинного строения в параметрах вариаций скоростей сдвиговых сейсмических волн вдоль профиля, в том числе к северу от Осетинской впадины, что осталось за рамками Ардонского профиля ММЗ.

Метод исследования

Для изучения глубинной структуры земной коры был применён метод микросейсмического зондирования [ММЗ] [Горбатиков и др., 2008]. Это дифференциальный амплитудный метод. Удобство его применения заключается в том, что измерения выполняются по принципу «отдельной станцией» последовательно в точках профиля. В качестве зондирующего сигнала используются фоновые микросейсмические колебания с частотой $f < 1$ Гц. Информативным параметром является степень искажения спектров исходного микросейсмического поля при его рассеянии на скоростных неоднородностях. Фазовая информация не используется. Форма и глубина залегания неоднородности оценивается исходя из пространственного распределения искажений спектра исходного поля, фиксируемого на земной поверхности, и частоты, на которой эти искажения проявляются в максимальной степени.

В последнее время ММЗ успешно применяется в широком круге задач для исследования структуры, свойств и параметров залегания различных объектов в различных геолого-географических условиях, включая решение как научно-исследовательских так и инженерных задач, в том числе в комплексе с другими независимыми методами [Danilov et al., 2021, 2023, 2025; Ovsyuchenko et al., 2023; Antonovskaya et al., 2024].

Подчеркнем, что ММЗ позволяет получить разрез в параметрах вариаций скоростей по отношению к региональной скоростной модели, но при этом в процедуре ММЗ используется лишь дисперсионная кривая, соответствующая этому скоростному разрезу. Саму скоростную модель разреза можно при этом не определять, но любая выбранная региональная скоростная модель должна обеспечивать именно ту дисперсионную кривую, которая принята в расчет.

Результаты и обсуждение

В соответствии с поставленной задачей был пройден профиль по методу микро-сейсмического зондирования, представленный на рисунке 1. Этот профиль включал в себя ранее выполненный фрагмент через Владикавказский разлом (пикеты V11-1 – V11-57) [Овсюченко и др., 2011]. Общая длина полного профиля составила 115 км, пространственный шаг между пунктами измерений выдерживался в пределах 500–750 м.

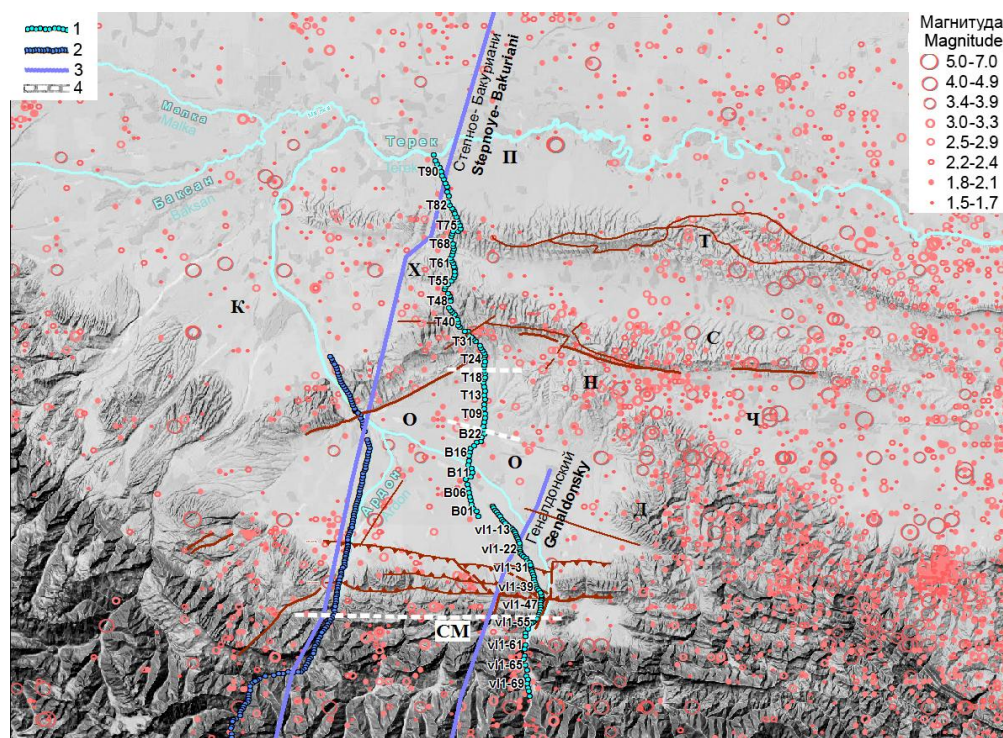


Рис. 1. Карта района работ. CM – Северная моноклираль Центрального Кавказа; впадины: О – Осетинская, К – Кабардинская, Ч – Чеченская, П – Предтерский прогиб; антиклинальные зоны: С – Сунженская, Т – Терская; поднятия: Х – Харбижинское, Н – Назрановское, Д – Датыхский выступ. 1 – Владикавказский профиль ММЗ, 2 – Ардонский профиль ММЗ, 3 – профиль ГСЗ Степное-Бакуриани и Геналдонский профиль МОВЗ и МТЗ, 4 – Граница между низкоскоростной аномалией вдоль северного склона Большого Кавказа и Назрановским поднятием в плане. Эпицентры сейсмических событий до 2003 г. – по (Специализированный каталог Уломова <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-%D0%A1%D0%9A%D0%97.pdf>), с 2003 г. – по каталогу ГС РАН (Электронный каталог землетрясений ЕГС РАН с 2003 г., <http://eqru.gsr.ru/index.php?inc=main>). Красные линии – разломы по [Письменный и др., 2021], (Карта активных разломов Евразии http://neotec.ginras.ru/index/mapbox/database_map.html). Линиями с бергштрихами обозначены три ветви Владикавказского разлома по [Овсюченко и др., 2011]. Использована цифровая модель рельефа Google Maps (<https://www.google.ru/maps/>) /

Fig. 1. Map of the work area. CM – Northern monoclinical of the Central Caucasus; depressions: О – Ossetian, К – Kabardian, Ч – Chechen, П – Predterkian depression; anticline zones: С – Sunzha, Т – Terkek; uplifts: Х – Kharbizhinskoye, Н – Nazranovskoye, Д – Datykhsky promontory. 1 – Vladikavkaz profile of the MSM, 2 – Ardon profile of the MSM, 3 – profile of the Stepnoye-Bakuriani deep seismic sounding (DSS) and Genaldonsky profile of the earthquake converted wave method (ECWM) and CSAMT, 4 – boundary between the low-velocity anomaly along the northern slope of the Greater Caucasus and the Nazran uplift in plan. Epicenters of seismic events until 2003 – according to (Specialized catalog of Ulomov <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-%D0%A1%D0%9A%D0%97.pdf>), since 2003 – according to the GS RAS catalog (Electronic catalog of earthquakes of the EGS RAS since 2003, <http://eqru.gsr.ru/index.php?inc=main>). Red lines – faults according to [Pismenniy et al., 2021], (Map of active faults in Eurasia http://neotec.ginras.ru/index/mapbox/database_map.html). The lines with bergstrich marks indicate the three branches of the Vladikavkaz fault according to [Ovsyuchenko et al., 2011]. A digital terrain model from Google Maps (<https://www.google.ru/maps/>) was used

Как видно на рисунке 1, на севере профиль ММЗ пересекает профиль ГСЗ Степное-Бакуриани, а на юге – Геналдонский профиль МОВЗ. Их проекция на разрез позволяет проследить установленные ранее глубинные границы в сопоставлении с новыми данными по ММЗ. Верхняя обменная граница Геналдонского профиля в Осетинской впадине на глубине около 5 км соответствует кровле мел-эоценовых отложений [Письменный и др., 2021]. А следующая, на глубине около 10 км, по-видимому, соответствует поверхности фундамента.

На разрезе ММЗ (рис. 2) желтыми и красными цветами обозначены зоны относительного понижения скоростей сдвиговых сейсмических волн, синими цветами обозначены зоны относительного повышения скоростей. Серые цвета означают, что в этих местах скорости близки к средней сглаженной скоростной модели. Отклонения выражаются в дБ, шкала отклонений представлена на рисунке справа. Заметим, что один и тот же цвет на разных глубинах может означать различные по абсолютной величине скорости, поскольку сглаженная региональная скоростная модель имеет различные скорости на разных глубинах. Используемая региональная модель приводится и обсуждается в [Gorbatikov et al., 2015] и в настоящей публикации не дублируется.

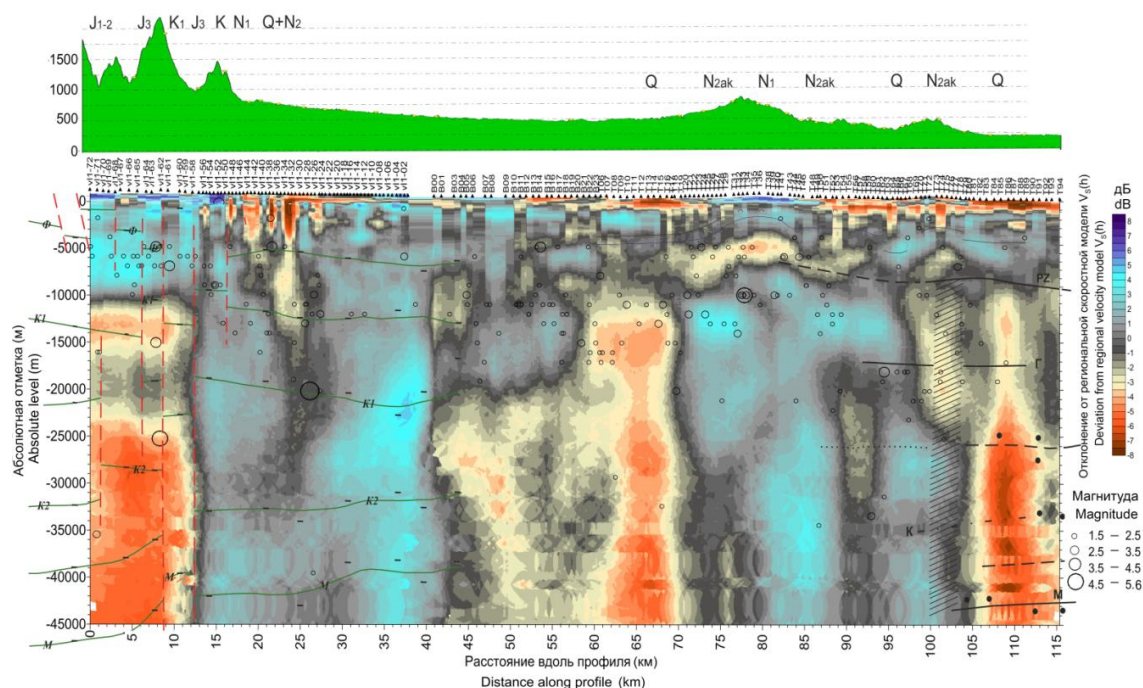


Рис. 2. Разрез по ММЗ с проекцией на него гипоцентров землетрясений из полосы шириной 30 км и проекцией результатов интерпретации Геналдонского профиля МОВЗ (в южной части) и профиля ГСЗ Степное-Бакуриани (в северной части). Φ – предполагаемая по МОВЗ поверхность фундамента, К и К2 – граница Конрада, М – граница Мохо, PZ и Г – поверхности, соответственно, палеозойского фундамента и «гранитного» слоя по результатам ГСЗ, красные линии – субвертикальные зоны нарушений корреляции волновых форм по [Шемпелев, 2008; Краснопецева и др., 1970] /

Fig. 2. Cross-section by MSM with the projection of earthquake hypocenters from a 30 km wide strip and the projection of the interpretation results of the Genaldonsky profile of the ECWM (in the southern part) and the Stepnoye-Bakuriani profile of the DSS (in the northern part). Φ – the surface of the basement assumed by the ECWM, K and K2 – Conrad boundary, M – Mohorovichich boundary, PZ and Г – surfaces of the Paleozoic basement and “granite” layer, respectively, according to the DSS results, red lines – subvertical zones of waveform correlation anomalies according to [Shempelev, 2008; Krasnopevtseva et al., 1970].

На разрезе под Северным склоном Большого Кавказа выделяется крупное низкоскоростное тело с кровлей приблизительно на глубине 10 км (пикеты V11-58 – V11-72). Аналогичная аномалия присутствует и на профиле ММЗ по Ардонскому ущелью. На обоих профилях она начинается в районе Пастбищного хребта и продолжается под северным крылом и осевой частью мегантиклинория Большого Кавказа [Gorbatikov et al., 2015]. Электрическое сопротивление в этой низкоскоростной области заметно превышает сопротивление вмещающих пород [Шемпелев, 2008]. Очень хорошее пространственное совпадение между низкоскоростной зоной по ММЗ и областью повышенных сопротивлений по МТЗ отмечено в работе [Gorbatikov et al., 2015]. Можно сформулировать гипотезу о тенденции к вертикальному «всплыванию» горного массива, над данной областью, предполагая здесь присутствие крупных источников тепла. На рисунке 2 видно, что имеется высокая латеральная корреляция между резким поднятием горного рельефа и положением границы этой заглубленной низкоскоростной области.

Далее на север (пикеты V11-57 – V11-21, рис. 2) профиль ММЗ пересекает зону Владикавказского разлома, который расположен на переходе между альпийским складчато-глыбовым сооружением Большого Кавказа и южной частью Терско-Каспийского прогиба – Осетинской впадиной. В верхних горизонтах осадочного чехла разлом представляет собой крупнейшую региональную флексурно-разрывную систему нарушений, особенно круто падающую (до вертикальной) в породах палеогена и миоцена и более пологую в плиоцен-четвертичных слоях. На разрезе ММЗ можно проследить три ветви Владикавказского разлома, которые отмечены на карте (см. рис. 1, диапазон между пикетами V11-45 – V11-30). Здесь Владикавказский разлом прослеживается до глубины как минимум 30 км, имеет субвертикальное строение. В работе [Овсюченко и др., 2011] уже отмечалось, что в приповерхностной части разломная зона имеет вид листрического складко-надвига, а в глубоких горизонтах земной коры представлена хорошо оформленной контрастной структурой субвертикального падения. Выразительные деформации молодых отложений и отчетливое проявление Владикавказского разлома на глубине позволяют уверенно считать его крупной сейсмогенерирующей структурой.

Сразу на север за Владикавказским разломом расположена наиболее погруженная и наименее нарушенная часть Осетинской впадины (пикеты V11-22 – V11-01). Линия профиля в этом месте претерпевает разрыв. Это объясняется физической недоступностью территории для измерений при проведении работ.

Вторая ветка профиля, начиная с пикета В00, расположена в переходной области от Осетинской впадины к Назрановскому поднятию (пикеты В00-В18). На разрезе здесь прослеживаются горизонтальные структуры, соответствующие залеганию осадочных пород, которые пересекаются системой разрозненных субвертикальных трещин, слабо проявляющихся на поверхности. Во всем диапазоне отмеченных пикетов на глубине 20 км и более прослеживается неконтрастная низкоскоростная зона, для интерпретации которой в настоящее время данных недостаточно, но можно видеть, что ее кровля совпадает с глубиной границы К1, которая ранее была выделена методом МОВЗ на Геналдонском профиле [Шемпелев, 2008].

В северной части Осетинской впадины профиль пересекает юго-западный отрог Назрановского (Назрано-Яндырского) поднятия (рис. 1). Поднятие выделяется повышенной сейсмической активностью. Милановский Е.Е. относит его к расположенной с востока наиболее сейсмически активной меридиональной зоне Кавказа [Милановский, 1968].

Назрановское поднятие на разрезе ММЗ выражается широкой низкоскоростной аномалией с кровлей на глубине около 10 км (пикеты В21-Т19). Обращает на себя внимание структурное подобие этой аномалии с низкоскоростной аномалией под северным склоном Большого Кавказа (пикеты V11-57 – V11-72). На этом основании можно предположить, что Назрановское поднятие является активно растущей в настоящее время тектонической структурой, а механизм и интенсивность ее роста аналогичны росту Большого Кавказа.

Глубинная структура Назрановского поднятия существенно отличается от глубинной структуры Сунженского хребта, расположенного в непосредственной близости с поднятием (рис. 1). Под Сунженским хребтом не наблюдается субвертикальных низкоскоростных аномалий, при том, что его высота в рельефе заметно превалирует над Назрановским поднятием в зоне их контакта.

Под Сунженским и под Терским хребтами на глубинах 5–10 км в разрезе ММЗ видны складчатые структуры. Наиболее отчетливо под Сунженским хребтом проявляется низкоскоростной слой Заманкульской антиклинали. По данным бурения и сейсморазведки МОВ этот слой соответствует относительно пластичным верхнеюрским соленосным (карбонатно-галогенным) отложениям. Обилие в пределах антиклинали слабой сейсмичности говорит о том, что процесс деформации продолжается в настоящее время.

Далее на север от Сунженского хребта профиль пересекает Харбиженское поднятие и Терский хребет, которые в рельефе выделяются значительно слабее, чем Сунженский хребет. На разрезе ММЗ можно различить систему заглубленных антиклиналей, которые соответствуют этим хребтам. Видно, что антиклинали имеют тенденцию к погружению в северном направлении. Данное погружение также подтверждается выделенной ранее по ГСЗ поверхностью палеозоя [Краснопевцева и др., 1970].

Судя по разрезу ММЗ и по привлеченным данным МОВ ОГТ, Терский хребет имеет аналогичный генезис Сунженскому хребту, то есть является складчатой структурой. Однако в рельефе он выглядит менее выраженным, чем Сунженский. Скорее всего, это связано именно с погружением фундамента в северном направлении. По разрезу ММЗ это погружение можно приблизительно оценить величиной 1.5–2 км на базе участка профиля между пикетами Т36 и Т76 (рис. 2).

Под Терским хребтом отчетливо выделяется раздробленная субвертикальная зона, которая прослеживается практически от поверхности и до глубин 25 км. Присутствие этой зоны подтверждается независимыми ранее проведенными работами по ГСЗ и МОВ ОГТ [Краснопевцева и др., 1970]. Восточнее профиля ММЗ данная раздробленная зона выходит на поверхность в виде разлома [Государственная ..., 2011].

В конце профиля под пикетами Т83-Т91 обнаруживается еще одна яркая низкоскоростная субвертикальная зона. Ее верхняя часть находится на глубине поверхности фундамента. Несмотря на контрастность ее проявления, видно, что глубинная структура этой зоны отличается от низкоскоростных областей под Большим Кавказом и под Назрановским поднятием. Можно предположить, что рассматриваемая низкоскоростная зона отражает собой глубинный разлом субширотного направления, который контролирует русло реки Терек. Эта глубинная разломная зона может являться границей между более погруженным и деформированным (в альпийскую или киммерийскую эпоху складчатости) южным крылом Терско-Каспийского прогиба и северным эпигерцинским платформенным крылом [Хаин и др., 2009].

Рассмотрим более подробно фрагмент разреза ММЗ по Владикавказскому профилю, относящийся к Сунженскому хребту (рис. 3). Как уже отмечалось, под хребтом отчетливо виден низкоскоростной слой Заманкульской антиклинали. Из данных по бурению известно, что по литологическому составу этот слой соответствует верхнеюрским карбонатно-галогеинным образованиям [Письменный и др., 2021].

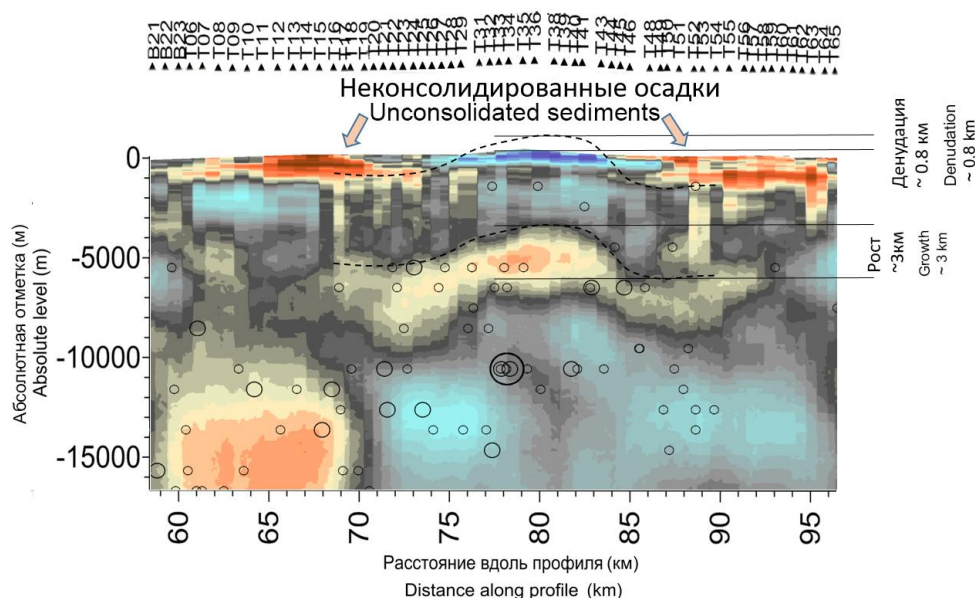


Рис. 3. Увеличенный фрагмент разреза Заманкульской антиклинали Сунженского хребта вдоль линии профиля. Пунктирными черными кривыми линиями показана форма антиклинали Сунженского хребта. Нижняя линия показывает форму антиклинально-изогнутой поверхности на глубинах, не подверженных эрозии. Верхняя линия повторяет форму нижней, но вынесена на поверхность так, чтобы концы кривой находились ниже накопленных продуктов эрозии. Верхняя кривая линия показывает, как выглядел бы Сунженский хребет в отсутствии денудации /

Fig. 3. Zoomed-in fragment of the Zamankulsky anticline of the Sunzhensky Ridge along the profile line. The black dotted lines show the shape of the Sunzhensky Ridge anticline. The lower line shows the shape of the anticlinal-curved surface at depths not subject to erosion. The upper line repeats the shape of the lower line, but is brought to the surface so that the ends of the curve are below the accumulated erosion products. The upper curved line shows what the Sunzhensky Ridge would look like in the absence of denudation

Обращает на себя внимание следующее обстоятельство: форма заглубленной антиклинали соответствует, но не тождественна форме разреза рельефа Сунженского хребта. Амплитуда антиклинали значительно больше амплитуды хребта. Это вполне объяснимо, если иметь в виду, что при горизонтальном сдавливании в поперечном к Кавказу направлении низкоскоростной заглубленный слой изгибается, формируя антиклиналь, а породы над ним одновременно претерпевают денудацию, ввиду их выхода на поверхность. Это предположение подкрепляется тем наблюдением, что относительные скорости сейсмических волн в ядре складки у поверхности выше (отмечено синим цветом на рис. 3), чем на ее крыльях (отмечено оранжевым цветом на рис. 3). Очевидно, низкоскоростные крылья могли быть сформированы неконсолидированными продуктами размыва Сунженского хребта во время его формирования.

Если принять, что донные части этих двух осадочных линз не претерпевали эрозии, то можно оценить, как бы выглядел Сунженский хребет, если бы денуда-

ция отсутствовала. Для этого на рисунке показаны две кривые линии пунктиром. Нижняя линия показывает форму антиклинально-изогнутой поверхности на глубинах, не подверженных эрозии, а верхняя линия вблизи поверхности закреплена за горизонты, не подвергшиеся денудации только своими концами. Именно над этими горизонтами, как видно, началось накопление эродированных осадков. Таким образом, верхняя кривая линия показывает, как выглядел бы Сунженский хребет в отсутствие денудации.

Существовавшая в Терско-Сунженской области ситуация способствовала местному складко- и надвигообразованию в очень короткий промежуток времени – ранний акчагыл (~ 3.6–2.6 млн лет назад). Однако отсутствие ярко выраженных неровностей в подошве акчагыла указывает на сравнительно медленный и спокойный рост антиклиналей. В позднем акчагыле и апшеронском веке (~2.6–1.8 млн лет назад) рост хребтов как элементов рельефа прекратился, и рассматриваемый район, особенно его западная часть, испытывал опускание [Чепалыга и др., 2018]. Рост складок хребтов после перерыва продолжался в антропогене, о чем свидетельствует современное, высоко напряженное состояние соленосной толщи [Короновский и др., 1990]. Имея в виду оценки времени роста хребтов в 1 млн лет в первую фазу активизации (ранний акчагыл, ~3.6–2.6 млн лет назад) и 1.8 млн лет во вторую фазу (антропоген), а также принимая во внимание наличие паузы ~0.8 млн лет, можно оценить среднюю скорость роста и денудации Сунженского хребта.

Чтобы произвести необходимую оценку, вначале следует понять, был ли Сунженский хребет полностью эродирован между фазами роста во время паузы продолжительностью 0.8 млн лет. Предположим, что вся денудация произошла только в периоды, относящиеся к росту, то есть в течение суммарного периода 2.8 млн лет. Сокращая искусственно время денудации, мы, таким образом, оцениваем ее максимально возможную скорость, которая оказывается равна ~0.29 мм/год.

Общий рост Сунженского хребта составил ~3 км за общее время 3.6 млн лет, состоящее из двух фаз роста и периода паузы. Средняя скорость роста за это время составляет ~0.83 мм/год. Очевидно, что в отдельные фазы роста скорость была выше (Скорость роста в период двух активных фаз 2.8 млн лет составляет ~1.07 мм/год). Но даже, если принять в расчет среднюю скорость роста за 3.6 млн лет, то за первую фазу в 1 млн лет рост составил не менее 830 метров. А суммарная денудация при ее максимальной оценке за первую фазу роста (1 млн лет) и период паузы (0.8 млн лет) не могла быть более 530 метров. Это означает, что за период паузы хребет не мог быть полностью размыт.

Таким образом, имеется возможность оценить не только среднюю скорость роста, но и среднюю скорость денудации, поскольку теперь известно, что она не прерывалась в период паузы роста ввиду полного разрушения хребта. Ее значение за период 3.6 млн лет оказывается ~0.22 мм/год, или примерно 25% от общего роста хребта (или примерно 20%, если считать скорость роста только в течение активных фаз).

Полученные оценки достаточно хорошо согласуются с оценками скорости денудации для района Сунженского хребта, определенной как 0.1–0.5 мм/год по стоку взвешенных наносов рек [Шарифуллин, 2014; Мозжерин, Шарифуллин, 2014]. А соотношение между скоростями роста и денудации примерно совпадает с оценкой Л.В. Паниной (как 5:1 для региона Кавказа) [Панина, 2019].

Наконец, интересно сравнить полученные оценки средней скорости роста Сунженского хребта, полученные по результатам профилирования через Заманкульскую антиклиналь и скорость роста, оцененную в пределах Эльхотовских ворот на основе исследования террас реки Терек, где по методике С.А. Несмеянова [Несмеянов, 1971] были рассчитаны амплитуды этапных поднятий и произведены оценки скоростей вертикальных тектонических деформаций в позднем плейстоцене – голоцене [Андреева и др., 2023].

Так, было получено, что скорости вертикального роста хребта составляли 2.25 и 3.6 мм/год соответственно в периоды QIII₃-QIV и QIII₂. Видно, что эти скорости в 3–4 раза выше, чем полученные по ММЗ средние скорости роста за время последних 3.6 млн лет. Обратим внимание, что даже в период позднего плейстоцена – голоцена скорости роста были неравномерны, что приводит к гипотезе, что рост хребта происходил этапами неравномерно. Естественно предполагать, что аналогичный режим сохранялся в течение всей его истории, и на современном этапе мы наблюдаем определенную активизацию роста. С другой стороны, превышение роста на коротком современном этапе в 3 раза по сравнению со средней скоростью представляется вполне нормальным, если принять во внимание периодическую сменяемость роста и стабилизации.

Выводы

Исследования глубинного строения северного фланга Большого Кавказа, Назрановского выступа, Сунженского и Терского хребтов, проведенные с применением микросейсмического зондирования (ММЗ) и других геофизических методов, позволили сделать ряд важных выводов о геодинамике этого региона. Полученные данные не только проясняют природу современных тектонических процессов, но и дают ключ к пониманию эволюции рельефа в течение неогена и четвертичного периода.

Значимой находкой стало обнаружение крупных низкоскоростных аномалий под северным флангом Большого Кавказа и Назрановским поднятием. Судя по тому, что низкоскоростные структуры обнаружены в пересечениях и на Ардонском профиле, и на Владикавказском, можно обосновано предполагать, что вдоль всего северного склона Большого Кавказа тянется отчетливо выраженная стенообразная низкоскоростная аномалия, строго коррелирующая по своему латеральному положению с резким подъемом рельефа при продвижении со стороны предгорной впадины в сторону горного массива.

Данную аномалию, уходящую на глубину 50–60 км и имеющую по данным МТЗ высокое электрическое сопротивление, можно интерпретировать как зону, связанную с тепловыми потоками и наличием флюида в изолированных микротрещинах. Ее присутствие объясняет активный вертикальный рост горного массива, поскольку менее плотные массы стремятся к «всплыванию», создавая тектонические напряжения в земной коре. Можно также предполагать, что аналогичный механизм обеспечивает современное движение Назрановского поднятия, которое фактически является горным отрогом Большого Кавказа.

В отличие от них, Сунженский и Терский хребты не имеют подобных обширных глубинных аномалий, что указывает на их принципиально иной генезис, связанный с горизонтальным сжатием и складчато-надвиговыми деформациями в осадочном чехле.

Формирование Сунженского хребта происходило в рамках двух основных тектонических фаз: в раннем акчагыле (3.6–2.6 млн лет назад) и антропогене (последние 1.8 млн лет), разделённых периодом тектонической стабилизации продолжительностью 0.8 млн лет. Результаты микросейсмического зондирования позволили идентифицировать на глубине 5–8 км не изменённую поверхностной эрозией антиклинальную складку амплитудой около 3 км. На основании сопоставления структуры осадочного чехла с возрастом начала тектонической активизации была рассчитана средняя скорость вертикальных движений, которая оказалась равной ~0.83 мм/год для всего периода развития, и ~1 мм/год, если вести расчет исключительно в фазах активного роста. Значительное (в 2–3 раза) превышение скоростей поднятия по оценкам для периода позднего плейстоцена-голоцена, свидетельствует о пульсационном характере геодинамического режима формирования Сунженского хребта, что находит убедительное подтверждение в независимых литературных источниках, приведенных в настоящем исследовании.

Определение амплитуды Заманкульской антиклинали Сунженского хребта и сравнение с ее выраженностью в современном рельефе позволило определить величину денудационного среза в ~ 0.8 км. Оценка средней скорости денудации (~0.22 мм/год) составила около 25% от скорости роста, что согласуется с независимыми оценками для горных систем Кавказа.

Литература

1. Андреева Н.В., Овсяченко А.Н., Кошевой Н.Г. Активная тектоника Сунженского хребта. // Материалы Всероссийской научной конференции «Динамическая геология – проблемы и достижения». М.: Перо, 2023. – С. 173–177.
2. Горбатиков А.В., Заалишвили В.Б., Харазова Ю.В., Степанова М.Ю., Милюков В.К., Миронов А.П., Хубаев Х.М., Мельков Д.А., Кануков А.С., Абаева З.В., Шманатов Г.В., Габараев А.Ф., Ревазов М.О. Глубинное строение, сейсмичность, тектоника северного фланга Большого Кавказа и Терско-Каспийского прогиба (Северная Осетия) в рамках единой кинематической модели на базе новых геофизических данных. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т 13. № 3. – С. 33–48. DOI: 10.46698/VNC.2023.44.73.003.
3. Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм. // Физика Земли. – 2008. – № 7. – С. 66–84.
4. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Комплект карт. Серия Скифская. Лист К-37 (Сочи), К-38 (Махачкала), К-39. 12 листов. Пояснительная записка. / Редакторы Н.И. Пруцкий, В.М. Юбко. – СПб: ВСЕГЕИ, 2011. – 446 с.
5. Коновалов В.И., Воцалевский З.С., Яловенко В.И. Перспективы нефтегазоносности юго-западной части Терско-Каспийского прогиба. // Геология нефти и газа. – 1987. – № 8. – С. 17–20.
6. Короновский Н.В., Гущин А.И., Никитин М.Ю., Панина Л.В., Стафеев А.Н. *Геологическое развитие и становление современной структуры Терско-Каспийского передового прогиба*. // В сборнике: Тектоника орогенных сооружений Кавказа и Средней Азии. М.: Наука, 1990 – С. 4–35.
7. Краснопевцева Г.В., Матушкин Б.А., Шевченко В.И. Новая интерпретация данных ГСЗ по профилю Степное-Бакуриани на Кавказе. // Советская геология. – 1970. – № 8. – С. 113–120.
8. Летавин А.И., Романов Ю.А., Савельева Л.М., Шумова Т.Ф. Тектоника Восточного Предкавказья. / Отв. редактор М.Ф. Мирчинк. – М.: Наука, 1975. – 80 с.

9. Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, – 1968. 483 с.
10. Мозжерин В.В., Шарифуллин А.Г. Оценка современного денудационного снижения гор по данным о стоке взвешенных наносов рек (на примере Тянь-Шаня, Памиро-Алая, Кавказа и Альп). // Геоморфология. – 2014. – № 1. – С. 15–23.
11. Несмеянов С.А. Количественная оценка новейших движений и неотектоническое районирование горной области: (На примере Зап. Ферганы и ее горного обрамления). М.: Недра, 1971. – 141 с.
12. Овсяченко А.Н., Горбатилов А.В., Степанова М.Ю., Ларин Н.В., Рогожин Е.А. Сейсмотектоника и глубинное строение зоны Владикавказского активного разлома. // Геофизические исследования. – 2011. – Т. 12. № 1. – С. 47–59.
13. Панина Л.В. Новейшие структуры и рельеф Земли. М.: ПРО-ПРЕСС, – 2019. 115 с.
14. Письменный А.Н., Горбачев С.А., Вертий С.Н., Зарубина М.А., Пичужков А.Н, Письменная Н.С., Терещенко В.В., Терещенко Л.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Издание второе. Серия Кавказская. Листы К-38-IX,XV (Владикавказ). Объяснительная записка. М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2021. – 225 с.
15. Стогний В.В., Заалишвили В.Б., Пономарева Н.Л. Современная геодинамика и сейсмичность Северного Кавказа: проблемы мониторинга. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. Т. 12. № 2. – С. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.00322.
16. Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л. Сейсмотектоника южной части Центрального сегмента Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 1. – С. 76–96. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006.
17. Чепалыга А.Л., Садчикова Т.А., Адаева Д.О., Идрисов И.А. Понто-Каспий на рубеже неогена и четвертичного периодов. // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Серия Естественные и точные науки. – 2018. – Т. 12. № 3. – С. 81–88. DOI: 10.31161/1995-0675-2018-12-3-81-88.
18. Шарифуллин А.Г. Причинно-факторные связи развития современной денудации. // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. – 2014. – Т. 156. № 2. – С. 135–146.
19. Шемпелев А.Г. Результаты глубинных геофизических исследований вдоль Геналдонского профиля. / Материалы Международной научно-практической конференции «Опасные природные и техногенные геологические процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа». Владикавказ: ЦГИ ВНИЦ РАН и РСО-А, 2008. – С. 457–463.
20. Antonovskaya G.N., Danilov K.B., Basakina I.M., Afonin N.Y., Kapustian N.K. Application Examples and Capabilities of Combining Passive Seismic Methods to Study Depth Structure of the Earth's Crust. // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2024. – Vol. 60. No. 4. – pp. 712–725.
21. Danilov K.B., Antonovskaya G.N., Basakina I.M., Shakhova E.V., Kapustian N.K. Passive Seismic Investigation of Intraplate Earthquakes Epicentral Zones in the North of Russia as One of the Ways to Understand Their Source Mechanics. // Journal of Earth Science. – 2025. – Vol. 36. No. 2. – pp. 764–780. DOI: 10.1007/s12583-024-0053-9.
22. Danilov K.B., Yakovlev E.Yu., Afonin N.Yu. Study of deep structure of the kimberlite pipe named after M. Lomonosov of the Arkhangelsk diamondiferous province obtained by joint using of passive seismic and radiometric methods. // Pure and Applied Geophysics. – 2021. – Vol. 178. No. 10. – pp. 3933–3952.
23. Danilov K.B., Yakovlev E.Yu., Afonin N.Yu., Druzhinin S.V. Deep structure of the Verkhnetovskaya kimberlite pipe in the Arkhangelsk diamondiferous province according to passive seismic and radiological methods. // Geophysical Prospecting. – 2023. – Vol. 71. Issue 9. – pp. 1873–1885. DOI: 10.1111/1365-2478.13254.
24. Gorbatikov A.V., Rogozhin E.A., Stepanova M.Y., Kharazova Y.V., Andreeva N.V., Perederin F.V., Dzeboev B.A., Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Gabaraev A.F. The

pattern of deep structure and recent tectonics of the greater Caucasus in the Ossetian sector from the complex geophysical data. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2015. – Vol. 51. No. 1. – pp. 26–37. DOI: 10.1134/S1069351315010073.

25. Ismail-Zadeh A., Muller B., Schilling F., Gorshkov A., Soloviev A. et al. Geodynamics, seismicity, and seismic hazards of the Caucasus. // *Earth-Science Reviews*. – 2020. – Vol. 207. Art. No. 103222. DOI:10.1016/j.earscirev.2020.103222.

26. Ovsyuchenko A.N., Zhostkov R.A., Edemsky D.E., Sobisevich A.L., Sysolin A.I., Presnov D.A. Active tectonics of North-Eastern Taymyr (Byrranga Mountains) and questions of seismotectonic regionalization of the Russian Arctic. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2023. – Vol. 59. No. 6. – pp. 1009–1024.

27. Rogozhin E.A., Milyukov V.K., Zaalishvili V.B., Ovsyuchenko A.N., Mironov A.P., Gorbatikov A.V., Melkov D.A., Dzeranov B.V. Characteristics of modern horizontal movements in Central Sector of Greater Caucasus according to GPS observations. // *Advances in Engineering Research*. – 2019. – Vol. 182. – pp. 250–254.

28. Zabelina I., Koulakov I., Amanatashvili I., Khrepy S.E., Al-Arifi N. Seismic structure of the crust and uppermost mantle beneath Caucasus based on regional earthquake tomography. // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2016. – Vol. 119. Issue 1. – pp. 87–99. DOI: 10.1016/j.jseas.2016.01.010.

References

1. Andreeva N.V., Ovsyuchenko A.N., Koshevoy N.G. Active tectonics of the Sunzha Ridge. In: *Proceedings of the All-Russian Scientific Conference “Dynamic Geology – Problems and Achievements”*. Moscow. Pero. 2023. pp. 173–177. (In Russ.)

2. Gorbatikov A.V., Zaalishvili V.B., Kharazova Yu.V., Stepanova M.Yu., Milyukov V.K., Mironov A.P., Khubaev Kh.M., Melkov D.A., Kanukov A.S., Abaeva Z.V., Shmanatov G.V., Gabaraev A.F., Revazov M.O. Deep structure, seismicity, tectonics of the northern flank of the Greater Caucasus and the Terek-Caspian trough (North Ossetia) within the framework of a unified kinematic model based on new geophysical data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 33–48. DOI: 10.46698/VNC.2023.44.73.003. (In Russ.)

3. Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu., Korablev G.E. Microseismic field affected by local geological heterogeneities and microseismic sounding of the medium. *Physics of the Earth*. 2008. No. 7. pp. 66–84. (In Russ.)

4. State Geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (3-rd generation). Set of maps. Scythian series. Lists K-37 (Sochi), K-38 (Makhachkala), K-39. 12 lists. Explanatory note. Eds. N.I. Prutsky, V.M. Yubko. Saint Petersburg. VSEGEI. 2011. 446 p. (In Russ.)

5. Konovalov V.I., Votsalevsky Z.S., Yalovenko V.I. Prospects for oil and gas bearing capacity of the south-western part of the Tersko-Caspian trough. *Geology of Oil and Gas*. 1987. No. 8. pp. 17–20. (In Russ.)

6. Koronovsky N.V., Gushchin A.I., Nikitin M.Yu., Panina L.V., Stafeyev A.N. Geological development and formation of the modern structure of the Tersko-Caspian foreland trough. In: *Tectonics of orogenic structures of the Caucasus and Middle Asia*. Moscow. Nauka. 1990. pp. 4–35. (In Russ.)

7. Krasnopevtseva G.V., Matushkin B.A., Shevchenko V.I. New interpretation of GSZ data along the Stepnoe-Bakuriani profile in the Caucasus. *Soviet Geology*. 1970. No. 8. pp. 113–120. (In Russ.)

8. Letavin A.I., Romanov Yu.A., Savelyeva L.M., Shumova T.F. Tectonics of the Eastern Ciscaucasia. Ed. M.F. Mirchink. Moscow. Nauka. 1975. 80 p. (In Russ.)

9. Milanovsky E.E. Recent tectonics of the Caucasus. Moscow. Nedra. 1968. 483 p. (In Russ.)

10. Mozzherin V.V., Sharifullin A.G. Estimation of current denudation rate of the mountains based on the suspended sediment runoff of the rivers (the Tien Shan, the Pamir-Alai, the Caucasus, and the Alps as an example). *Geomorfologiya*. 2014. No. 1. pp. 15–23. (In Russ.)

11. Nesmeyanov S.A. Quantitative assessment of the latest movements and neotectonic zoning of mountainous areas: (Based on the example of Western Fergana and its mountainous surroundings). Moscow. Nedra. 1971. 141 p. (In Russ.)
12. Ovsyuchenko A.N., Gorbaticov A.V., Stepanova M.Yu., Larin N.V., Rogozhin E.A. Seismotectonics and deep structure of the Vladikavkaz fault zone. *Geophysical Research*. 2011. Vol. 12. No. 1. pp. 47–59. (In Russ.)
13. Panina L.V. Recent structures and relief of the Earth. Moscow. PRO-PRESS. 2019. 115 p. (In Russ.)
14. Pismenniy A.N., Gorbachev S.A., Vertiy S.N., Zarubina M.A., Pichuzhkov A.N., Pismennaya N.S., Tereshchenko V.V., Tereshchenko L.A. State geological map of the Russian Federation at a scale of 1 : 200 000. Second edition. Caucasian series. Lists K-38-IX,XV (Vladikavkaz). Explanatory note. Moscow. Moscow branch of FSBI VSEGEI. 2021. 225 p. (In Russ.)
15. 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. No. 2. pp. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.00322. (In Russ.)
16. Stogny V.V., Stogny G.A., Ponomareva N.L. Seismotectonics of the southern part of the Greater Caucasus Central segment. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 76–96. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006. (In Russ.)
17. Chepalyga A.L., Sadchikova T.A., Adaeva D.O., Idrisov I.A. Ponto-Caspian at the boundary between Neogene and Quaternary. *Proceedings of Dagestan State Pedagogical University. Series: Natural and Exact Sciences*. 2018. Vol. 12. No. 3. pp. 81–88. DOI: 10.31161/1995-0675-2018-12-3-81-88. (In Russ.)
18. Sharifullin A.G. Causal-factor relations of modern denudation development. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*. 2014. Vol. 156. No. 2. pp. 135–146. (In Russ.)
19. Shempelev A.G. Results of deep geophysical surveys along the Genaldon profile. In: *Proc. Dang. nat. and tech. geological processes in mountainous and foothill areas of the North Caucasus. Vladikavkaz. CGI VSC RAS and RNO-A*. 2008. pp. 457–463. (In Russ.)
20. Antonovskaya G.N., Danilov K.B., Basakina I.M., Afonin N.Y., Kapustian N.K. Application Examples and Capabilities of Combining Passive Seismic Methods to Study Depth Structure of the Earth's Crust. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2024. Vol. 60. No. 4. pp. 712–725.
21. Danilov K.B., Antonovskaya G.N., Basakina I.M., Shakhova E.V., Kapustian N.K. Passive Seismic Investigation of Intraplate Earthquakes Epicentral Zones in the North of Russia as One of the Ways to Understand Their Source Mechanics. *Journal of Earth Science*. 2025. Vol. 36. No. 2. pp. 764–780. DOI: 10.1007/s12583-024-0053-9.
22. Danilov K.B., Yakovlev E.Yu., Afonin N.Yu. Study of deep structure of the kimberlite pipe named after M. Lomonosov of the Arkhangelsk diamondiferous province obtained by joint using of passive seismic and radiometric methods. *Pure and Applied Geophysics*. 2021. Vol. 178. No. 10. pp. 3933–3952.
23. Danilov K.B., Yakovlev E.Yu., Afonin N.Yu., Druzhinin S.V. Deep structure of the Verkhnetovskaya kimberlite pipe in the Arkhangelsk diamondiferous province according to passive seismic and radiological methods. *Geophysical Prospecting*. 2023. Vol. 71. Issue 9. pp. 1873–1885. DOI: 10.1111/1365-2478.13254.
24. Gorbaticov A.V., Rogozhin E.A., Stepanova M.Y., Kharazova Y.V., Andreeva N.V., Pereaderin F.V., Dzeboev B.A., Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Gabaraev A.F. The pattern of deep structure and recent tectonics of the greater Caucasus in the Ossetian sector from the complex geophysical data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2015. Vol. 51. No. 1. pp. 26–37. DOI: 10.1134/S1069351315010073.
25. Ismail-Zadeh A., Muller B., Schilling F., Gorshkov A., Soloviev A. et al. Geodynamics, seismicity, and seismic hazards of the Caucasus. *Earth-Science Reviews*. 2020. Vol. 207. Art. No. 103222. DOI:10.1016/j.earscirev.2020.103222.

26. Ovsyuchenko A.N., Zhostkov R.A., Edemsky D.E., Sobisevich A.L., Sysolin A.I., Presnov D.A. Active tectonics of North-Eastern Taymyr (Byrranga Mountains) and questions of seismotectonic regionalization of the Russian Arctic. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2023. Vol. 59. No. 6. pp. 1009–1024.
27. Rogozhin E.A., Milyukov V.K., Zaalishvili V.B., Ovsyuchenko A.N., Mironov A.P., Gorbatikov A.V., Melkov D.A., Dzeranov B.V. Characteristics of modern horizontal movements in Central Sector of Greater Caucasus according to GPS observations. *Advances in Engineering Research*. 2019. Vol. 182. pp. 250–254.
28. Zabelina I., Koulakov I., Amanatashvili I., Khrepy S.E., Al-Arifi N. Seismic structure of the crust and uppermost mantle beneath Caucasus based on regional earthquake tomography. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2016. Vol. 119. Issue 1. pp. 87–99. DOI: 10.1016/j.jseaes.2016.01.010.

УДК 550.834, 551.21

DOI: 10.46698/VNC.2025.91.86.001

Оригинальная статья

Проявление в низкочастотном поле микросейсм глубинных неоднородностей грязевого вулкана Джау-Тепе

З.И. Дударов¹, Д.Е. Белобородов²

¹ Единая геофизическая служба РАН, Россия, 249035,
г. Обнинск, пр. Ленина, 189, e-mail: zalim-dudar@yandex.ru;

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия, 123242, г. Москва,
ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1, e-mail: beloborodov@ifz.ru

Статья поступила: 11.02.2025, доработана: 11.05.2025, принята к публикации: 16.05.2025

Резюме: Исследование направлено на изучение с применением современных геофизических технологий внутренней структуры и механизма деятельности грязевого вулкана Джау-Тепе, являющегося одним из крупных элементов Керченско-Таманской грязевулканической провинции. **Актуальность работы.** Изучение глубинной структуры грязевых вулканов, строения и механизмов работы их флюидопроводящих систем – необходимое и важное условие для понимания процессов грязевого вулканизма. Для возможного прогнозирования пароксизмальных крупных извержений, сопровождающихся разрушениями, локальными землетрясениями и просадками грунта требуется четкое понимание устройства и механизма работы аппарата грязевого вулкана, динамики доставки флюидного вещества. **Цель работы** – изучение внутреннего строения грязевого вулкана Джау-Тепе и структуры глубинных каналов доставки флюидного вещества опираясь на данные площадной съемки пассивного геофизического метода сейсморазведки с последующим анализом и интерпретацией полученных результатов. **Методы.** Исследование проводилось геофизическим методом микросейсмического зондирования, основанным на анализе низкочастотной составляющей амплитудных спектров поверхностных волн Рэлея, зарегистрированных с использованием широкополосных сейсмических измерительных систем в 56 пунктах площадной съемки с последующим анализом массива данных авторским программным комплексом MDP-3D. **Результаты исследований.** Анализ низкочастотной составляющей амплитудных спектров поверхностных волн Рэлея в диапазоне частот 0.03–1.2 Гц, позволил построить геофизическую объемную структурную модель распределения относительной интенсивности микросейсм до глубины 18 км, показывающую относительное изменение скоростных характеристик среды под грязевым вулканом. На глубине 6 км и ниже непосредственно выявлено мощное ярко выраженное низкоскоростное тело, корни которого уходят вглубь до отметки 18 км и далее, демонстрирующее характерные размеры и формы резервуаров накопления грязебрекчий, а также возможные источники и пути миграции сверхглубинных флюидов.

Ключевые слова: грязевой вулкан Джау-Тепе, глубинное строение, флюидопроводящие структуры, корневые структуры, микросейсмы, поверхностные волны, микросейсмическое зондирование.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственных заданий ФИЦ ЕГС РАН (№ 075-00604-25) и ИФЗ РАН (№ 0144-2019-0019).

Для цитирования: Дударов З.И., Белобородов Д.Е. Проявление в низкочастотном поле микросейсм глубинных неоднородностей грязевого вулкана Джау-Тепе. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 103–115. DOI: 10.46698/VNC.2025.91.86.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.91.86.001

Original paper

Identification of deep inhomogeneities of the Dzhau-Tepe mud volcano in the low-frequency field of microseisms

Z.I. Dudarov¹, D.E. Beloborodov²

¹ Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 189 Lenin Ave., Obninsk 249035, Russian Federation, e-mail: zalim-dudar@yandex.ru;

² Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10/1 B. Gruzinskaya Str., Moscow 123242, Russian Federation, e-mail: beloborodov@ifz.ru

Received: 11.02.2025, revised: 11.05.2025, accepted: 16.05.2025

Abstract: The research is aimed at studying the internal structure and mechanism of activity of the Dzhau-Tepe mud volcano, which is one of the major elements of the Kerch-Taman mud volcanic province using modern geophysical technologies. **Relevance.** The study of the deep structure of mud volcanoes, the structure and mechanisms of their fluid-conducting systems is a necessary and important condition for understanding the processes of mud volcanism. For possible prediction of paroxysmal large-scale eruptions accompanied by destruction, local earthquakes and subsidence of soil, a clear understanding of the structure and mechanism of the mud volcano apparatus and the dynamics of fluid delivery is required. **Aim.** The study of the internal structure of the Dzhau-Tepe mud volcano and the structure of deep channels for the delivery of fluid based on data from the areal survey of the passive geophysical method of seismic exploration, followed by analysis and interpretation of the results. **Methods.** The study was carried out using the geophysical microseismic sounding method based on the analysis of the low-frequency component of the amplitude spectra of surface Rayleigh waves recorded using broadband seismic measuring systems at 56 points of area survey, followed by an analysis of the data array by the author's MDP-3D software package. **Results.** Analysis of the low-frequency part of the amplitude spectra of surface Rayleigh waves in the frequency range 0.03-1.2 Hz allowed us to construct a geophysical volumetric structural model of the distribution of the relative intensity of microseisms to a depth of 18 km, showing a relative change in the velocity characteristics of the environment under the mud volcano. At a depth of 6 km and below, a powerful, pronounced low-velocity body was directly detected, the roots of which extend deep to the 18 km mark and beyond, demonstrating the characteristic sizes and shapes of mud-breccia accumulation reservoirs, as well as possible sources and migration routes of ultra-deep fluids.

Keywords: Dzhau-Tepe mud volcano, deep structure, fluid-conducting structures, root structures, microseisms, surface waves, microseismic sounding.

Acknowledgement: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the state assignments FRC GS RAS (No. 075-00604-25) and IPE RAS (No. 0144-2019-0019).

For citation: Dudarov Z.I., Beloborodov D.E. Identification of deep inhomogeneities of the Dzhau-Tepe mud volcano in the low-frequency field of microseisms. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 103-115. DOI: 10.46698/VNC.2025.91.86.001

Введение

Грязевой вулканизм является флюидодинамическим природным процессом, сопровождающимся переносом на дневную поверхность Земли глубинных грязевулканических масс по каналам с высокой флюидопроницаемостью, которые в свою

очередь приурочены к крупным тектоническим разрывным нарушениям земной коры [Якубов, 1980]. Стоит отметить, что тектонические нарушения являются важным фактором формирования грязевых вулканов (ГВ), но не рассматриваются в качестве единственной причины их образования. Ведущую роль в формировании ГВ играют толщи пластичных глинистых пород в осадочной оболочке Земли и пластовые воды, т.е. смесь воды и газов, которые под высоким давлением и температурой трансформируют вмещающие терригенные породы в полужидкую мобильную массу. Этот процесс принято называть АВПД – аномально высокое пластовое давление. Присутствие смеси углеводородных газов, углекислого и некоторых других, образованных из рассеянных в осадочных породах органических веществ за счет химических процессов и геотермического градиента приводит к возникновению в недрах критически высоких пластовых давлений. Образовавшаяся глубинная однородная масса, состоящая из глинистой компоненты – минералов глин, характерных для «материнского» слоя, обломков вмещающих горных пород, воды и газов различного состава, становится зоной сверхвысоких пластовых давлений флюидов, которые доставляют на дневную поверхность флюидонасыщенную смесь, формируя наземные структуры грязевых вулканов различной морфологии.

Исследования, связанные с изучением ГВ являются актуальными, так как они выступают индикаторами существования в зонах их функционирования привлекательных с экономической точки зрения нефтяных продуктов [Якубов, 1980], также могут создавать опасность для людей и промышленных объектов [Korzhnikov et al., 2021], кроме того, являются одним из основных источников метана, который попадая в атмосферу нарушает климатический баланс Земли [Jones et al., 2023; Mazzini et al., 2021]. При этом грязевулканический метан в недрах Земли образуется под влиянием различных факторов [Lavrushin et al., 2022].

На территории современной России крупнейшей зоной сосредоточения грязефлюидной активности является Керченско-Таманская грязевулканическая провинция (КТГП), занимающая второе место в мире по количеству грязевых вулканов, находящихся в разных фазах активности.

Использование метода микросейсмического зондирования, как пассивного метода сейсморазведки, основанного на анализе волнового спектра естественного микросейсмического шума, позволило эффективно исследовать отдельные грязевые вулканы КТГП [Собисевич и др., 2008; Рогожин и др., 2014], в том числе Джау-Тепе [Presnov et al., 2020], и построить современные геофизические структурные модели вулканов. Амплитудно-частотный и пространственно-временной анализ низкочастотной составляющей микросейсмических сигналов, полученных площадной съёмкой на Джау-Тепе, позволил «заглянуть глубже» и получить новые данные о сверхглубинных корнях вулкана, дополняющие наши ранее полученные результаты [Presnov et al., 2020].

Геологическая позиция объекта исследования

Керченско-Таманская грязевулканическая провинция расположена в зоне сочленения горно-складчатых сооружений Крыма и Кавказа (рис. 1а), где происходит погружение орогенных складчатых структур мегантиклинория Большого Кавказа под слабодислоцированный кайнозойский чехол поперечного Керченско-Таманского и передового Западно-Кубанского прогибов.

ГВ КТГП расположены на Керченском и Таманском полуостровах, часть на

южной границе Краснодарского края, кроме того, наблюдается их присутствие в прибрежной зоне Азовского и Черного морей. ГВ пространственно и генетически связаны с антиклинальными майкопскими диапировыми структурами в зонах систем разрывных нарушений, которые способствуют перемещению глубинных насыщенных водой и газами грязефлюидных масс с выходом сопочных брекчий на поверхность.

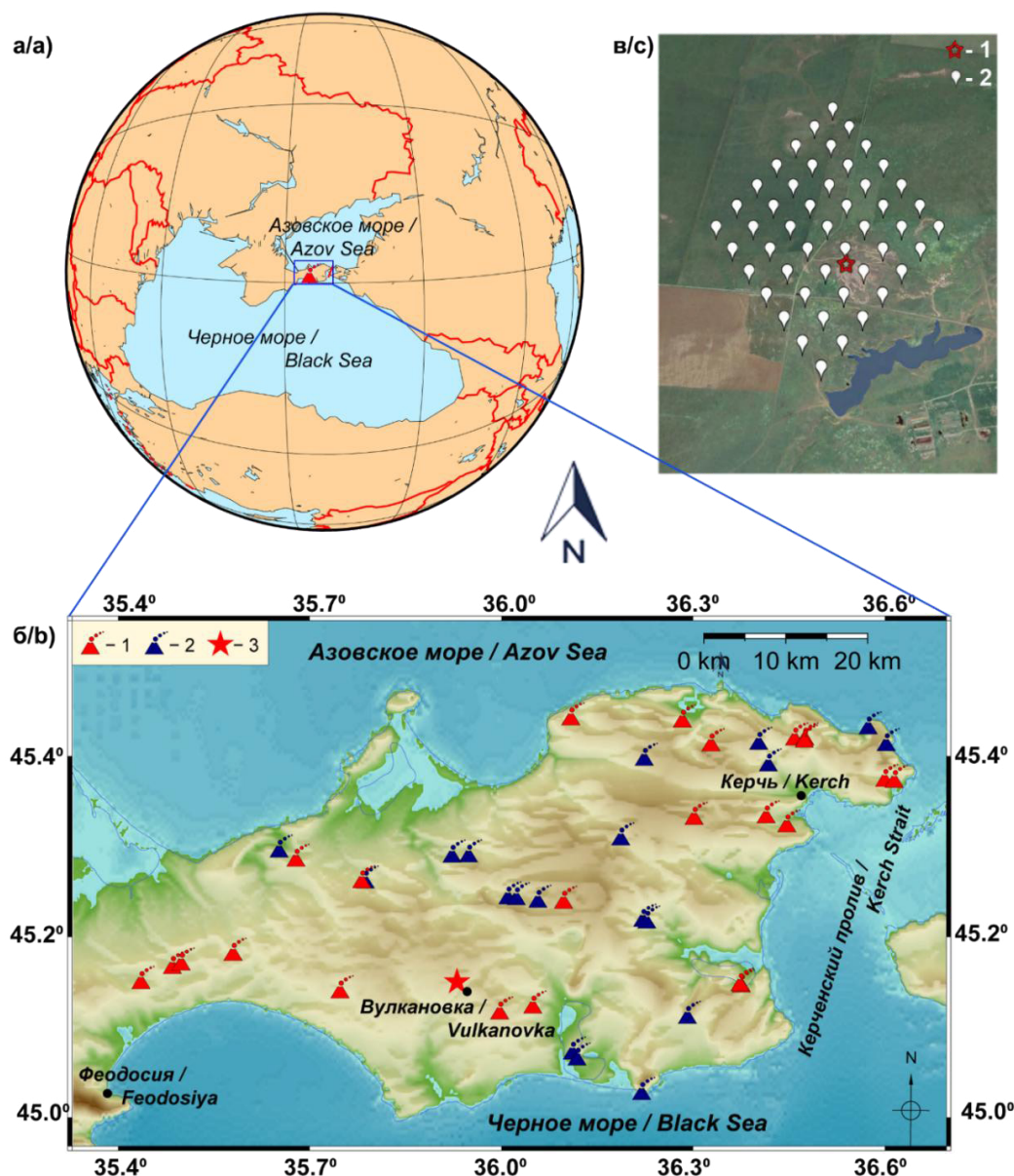


Рис. 1. Общая информация об объекте исследования:

а – территориальное положение объекта исследования; б – карта-схема Керченского полуострова (1 – действующие и активные грязевые вулканы, 2 – неактивные и слабоактивные вулканы, 3 – вулкан Джау-Тепе); в – схема проведенных геофизических исследований на грязевом вулкане Джау-Тепе (1 – положение вулкана Джау-Тепе, 2 – пункты регистрации микросейсмических сигналов) /

Fig. 1. General information about the research object:

а – the territorial location of the research object; б – the map diagram of the Kerch Peninsula (1 – active mud volcanoes, 2 – inactive and weakly active volcanoes, 3 – Dzhau-Tepe volcano); в – the scheme of the conducted geophysical research on the mud volcano Dzhau-Tepe (1 – the position

of the volcano Dzhaui-Tepe, 2 – microseismic signal registration points)

Стоит отметить, что состав и свойства отдельных слоев осадочной толщи являются важными факторами формирования общей корневой системы вулкана. В данном случае, в качестве корневой системы грязевого вулкана как единого целого рассматривается совокупность грязевулканических камер (близповерхностная, глубинная), выводящих каналов разной ориентации и формы, по которым на поверхность поступает грязевулканическая масса («ил» – мелкодисперсное минеральное вещество пеллитовой размерности, обломки осадочных пород, отдельные минералы, вода, различные газы).

Самым крупным ГВ на Керченском полуострове (рис. 1б), является Джау-Тепе, расположенный вблизи п. Вулкановка в Ленинском районе республики Крым. Высота вулкана 60 метров относительно уровня местности. По классификации [Mazzini, Etiope, 2017] вулкан относится к коническому типу и имеет конусообразную морфологию, для которого характерен центральный кратер, окруженный наложенными друг на друга грязевулканическими образованиями в результате периодических извержений полужидких глинистых масс (рис. 2а).

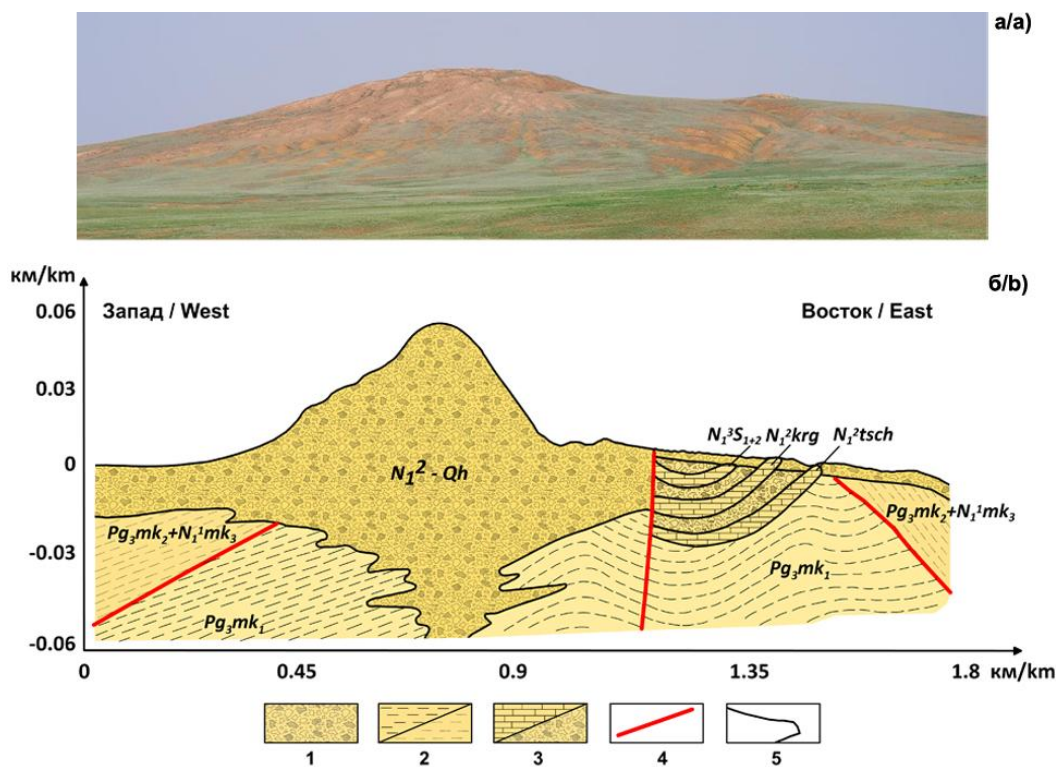


Рис. 2. Грязевой вулкан Джау-Тепе.

а – общий вид вулкана; б – геологический разрез вулкана Джау-Тепе вдоль близширотного профиля по [Shnyukov, Yanko-Hombach, 2020], с дополнениями: 1 – сопочная брекчия разновременных генераций N_1^2-Qh ; 2 – глины сланцеватые среднего Pg_3mk_1 и позднемайкопского $Pg_3mk_2-N_1^1mk^3$ возраста; 3 – горные породы Вулкановской вдавленной синклинали – известняки и сопочная брекчия миоценового возраста: $N_1^3s_{1+2}$ – сарматский ярус, N_1^2krq – караганский горизонт, N_1^2tsch – чокракский горизонт; 4 – разрывные нарушения; 5 – границы несогласных залеганий /

Fig. 2. Dzhaui-Tepe mud volcano.

а – general view of the volcano; б – geological section of the Dzhaui-Tepe volcano along the near-latitude profile according to [Shnyukov, Yanko-Hombach, 2020] with modification: 1 – volcanic breccia of different generations N_1^2-Qh ; 2 – shaly clays of Middle Pg_3mk_1 and Late Maikopian $Pg_3mk_2-N_1^1mk^3$ period; 3 – limestones and hill breccia of Miocene age: $N_1^3s_{1+2}$ the Saratian stage, N_1^2krq a Karagan

horizon, N_1^2 tsch a Chokrak horizon; 4 – faults; 5 – the boundaries of dissenting structures

За последние полтора века были отмечены несколько случаев извержения Джау-Тепе [Shnyukov, Yanko-Hombach, 2020] с различной степенью интенсивности, в том числе с выбросом вулканической массы на высоту до 50 м, сопровождавшихся возгоранием выделяющегося газа, а также наблюдались периодические слабоактивные функционирования одиночных грифонов. Регулярные взрывные – эксплозивные выбросы газов с обильным излиянием сопочной брекчии отмечаются во многих работах [Shnyukov, Yanko-Hombach, 2020].

Структура вулкана расположена в центре Вулкановской антиклинали, широтно ориентированной. На поверхности фиксируются глинисто-терригенные и карбонатные отложения чокракского, караганского и сарматского ярусов. Ранее, разведочным бурением (Отчет о результатах нефтегазопроискового бурения на Северо-Вулкановской площади по состоянию на 1989 г. / Борисова Л.И., Рамская Н.Е., Хорюшина З.П. – Симферополь: Крымгеология. 1989. 246 с.) в районе вулкана исследована Вулкановская антиклинальная структура, представленная глинистыми породами раннемайкопского возраста в ядре складки и слоями глин средне- и позднемайкопского возраста на склонах (рис. 2б).

Антиклинальные зоны, в которых проявлен грязевой вулканизм Керченского полуострова, можно выделить Северную (или Приазовскую), Центральную (Припарпачскую) и Южную (Юго-Западной равнины). Они характеризуются широтными ориентировками, обстановками сжатия с формированием антиклинальных структур также субширотного или северо-восточного простирания. Каждая зона состоит из нескольких кулисно подстраивающих друг друга диапировых антиклиналей. Южная зона, к которой относится структура вулкана, наименее выражена в рельефе, что вероятно, является отражением высокого уровня эрозионно-денудационного среза. Южная зона, как и цепочки грязевых вулканов, в целом, имеет широтную ориентировку. Это проявление характерно для регионального уровня, когда грязевой вулканизм активно проявляется в узлах пересечения основных антиклинальных грязевулканических зон, которым соответствуют системы структур широтного и северо-западного простирания [Skripytsyna et al., 2020].

Сейсморазведочные работы по МОГТ в районе ГВ Джау-Тепе и результаты бурения позволили построить малоглубинную, по меркам метода микросейсмического зондирования, геолого-геофизическую модель, где выделенная разломная структура интерпретирована как корневая система вулкана, которая была дополнена новыми данными [Presnov et al., 2020], по которым была уточнена близповерхностная камера накопления грязевулканического вещества и показана форма канала их поступления.

Метод исследования

Принцип изменения амплитудного спектра микросейсм при взаимодействии с глубинными неоднородностями, которые обладают различной плотностью и скоростными характеристиками является основой, которая заложена в методе микросейсмического зондирования [Горбатиков и др., 2008]. При прохождении заглубленных низкоскоростных структур происходит увеличение спектральной амплитуды низкочастотного микросейсмического сигнала, и наоборот высокоскоростные среды способствуют ее уменьшению. Учитывая специфику рассеивания микросейсмического поля, субвертикальные геологические структуры являются более

предпочтительными для выявления и оконтуривания, чем горизонтальные формирования. Вулканы, в том числе грязевые, в основном по своей морфологии имеют субвертикальную структуру неоднородностей, поэтому использование технологии микросейсмического зондирования для их изучения является одним из надежных методов [Gorbatikov et al., 2018; Собисевич и др., 2008; Рогожин и др., 2014]. Кроме того, метод активно используется при изучении разрывных нарушений разной природы [Rogozhin et al., 2020; Горбатилов и др., 2023].

В качестве информативного зондирующего сигнала в ММЗ используются низкочастотные микросейсмические волны в основном естественного происхождения. Результаты численных исследований [Горбатилов, Цуканов, 2011] показали, что у метода разрешающая способность по горизонтали оценивается как $(0.25-0.3)\lambda$, а по вертикали порядка 0.3λ , где λ – эффективная зондирующая длина волны. Кроме того, было установлено, что метод позволяет восстанавливать изображение небольшой изолированной неоднородности даже в том случае, если ее размеры меньше длины волны в 10 и более раз [Горбатилов, Цуканов, 2011].

Выдерживая требования метода на грязевом вулкане Джау-Тепе на 56 точках, согласно схеме как показано на рисунке 1в были зарегистрированы статистически устойчивые фоновые микросейсмические волны (2 часа и более) с использованием широкополосных сейсмических станций на базе цифровых регистраторов сигналов Ref-Tek-130 (производство «Refraction Technology, Inc.», США) и сейсмоприемников СМЗ-ОС с гладкой амплитудно-частотной характеристикой в диапазоне частот от 0.03 до 10 Гц (производство ООО «Микросейсм», Россия), которые прошли метрологические испытания на специализированном вибростенде ФИЦ ЕГС РАН. Также перед началом полевых исследований для корректного сопоставления полевых сигналов была проведена сверка измерительных комплектов. Расстояние между точками регистрации фоновых колебаний составляло в среднем 250 м. Для максимального изолирования от внешнего воздействия (ветрового, солнечного и т.д.) измерительные системы устанавливались в заранее подготовленные площадки и закрывались полностью. Учет трендовых региональных вариаций микросейсмического поля выполнялся с использованием опорной станции, которая была установлена в 8 км от вулкана вдали от техногенных источников помех и работала непрерывно на весь период проведения полевых исследований.

Расчет относительной интенсивности микросейсмических сигналов вертикальной компоненты смещения в каждой точке и для каждой частоты амплитудного спектра был выполнен в программном комплексе MDP-3D (Дударов З.И., Кандохов З.М. Microseism Data Processor – 3D (MDP-3D). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613926 от 11.03.2022 г.). Процедура камеральной обработки микросейсмических данных методом микросейсмического зондирования подробно описана в работе [Роров и др., 2014]. В расчетах значение эмпирического коэффициента глубинной привязки было равно величине 0.3 в соответствии с [Presnov et al., 2020]. Следует отметить, что данный параметр влияет только на глубину залегания выявленной неоднородности, а горизонтальные размеры контура и его горизонтальное положение никак не зависят от указанного коэффициента.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам обработки массива полевых данных построена до глубины 18 км геофизическая объемная структурная модель (рис. 3а) распределения относитель-

ной интенсивности микросейсм, показывающая относительное изменение скоростных характеристик среды под вулканом. На рисунке вскрытые разнородные структуры, выраженные в дБ, соответствуют цветовой шкале относительной интенсивности микросейсм (I). Положительные значения интенсивности реакции среды (теплые тона) соответствуют пониженным значениям скоростей поверхностных волн и интерпретируются в основном как флюидонасыщенные, разуплотнённые структуры, а отрицательные значения реакции (холодные тона) свидетельствуют о наличии непроницаемых консолидированных пород, которые для наглядности на разрезе (рис. 3а) показаны частично прозрачными. Параметры выявленной прямо под вулканом приповерхностной грязевулканической камеры (область 1 на рис. 3а) подробно описаны в [Presnov et al., 2020] и не рассматриваются в настоящей работе.

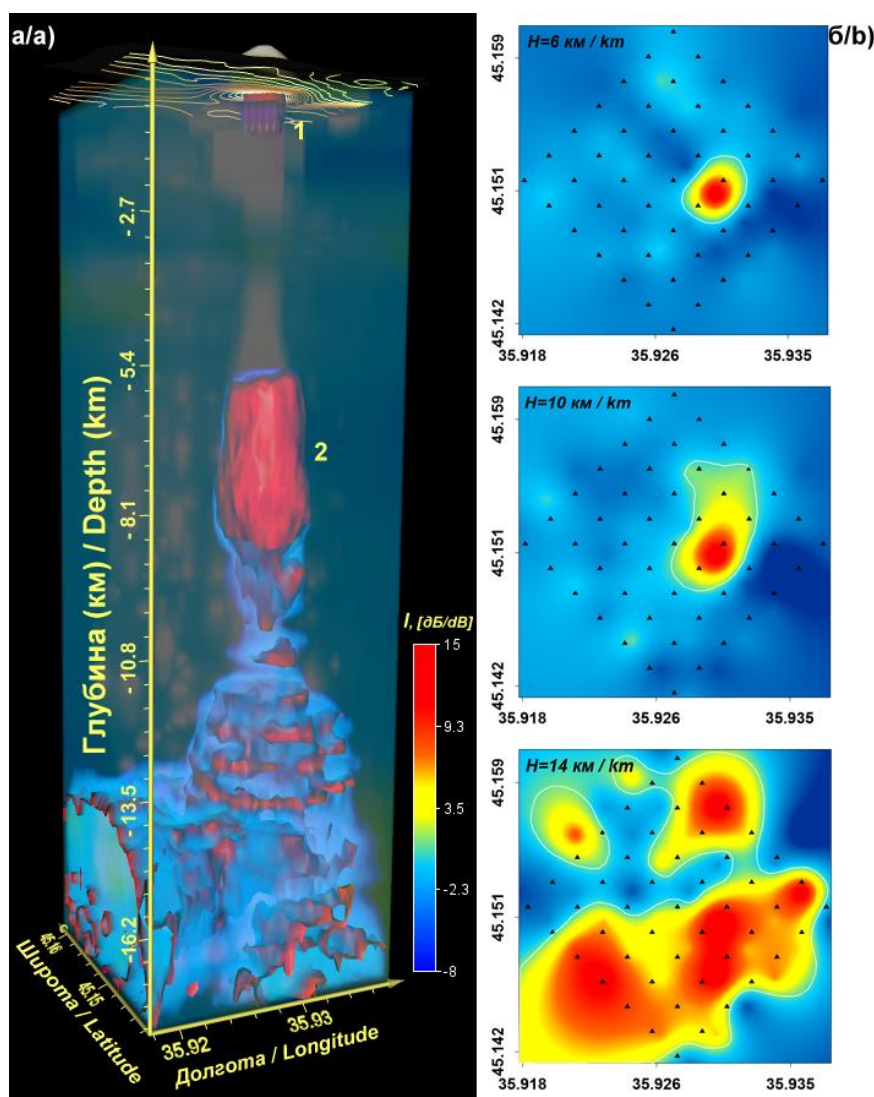


Рис. 3. Глубинная геофизическая структурная модель грязевого вулкана Джаяу-Тепе (а) и горизонтальные срезы для глубин 6, 10 и 14 км (б) /

Fig. 3. Deep geophysical structural model of the Dzhaui-Tepe mud volcano (a) and horizontal sections for depths of 6, 10 and 14 km (b)

Интерпретация микросейсмического поля в диапазоне низких частот от 0.03 до 1.2 Гц позволила выявить на глубине 6 км и ниже непосредственно под вулканом

мощное ярко выраженное низкоскоростное тело, корни которого уходят вглубь до отметки 18 км и более (область 2 на рис. 3а). Такие сверхглубинные структуры с характерными сейсмическими свойствами наблюдаются в толще земной коры и по данным геолого-геофизических исследований интерпретируются как осадочные инъекции [Доценко, 2010], питающие системы грязевых вулканов [Собисевич и др., 2008; Рогожин и др., 2014; Шнюков, Нетребская, 2016], зоны дробления и субвертикальные зоны деструкции [Бембель и др., 2003], а также рассматриваются в качестве потоков глубинных мантийных газов [Шнюков, Нетребская, 2014].

На территории Южно-Каспийской впадины такие субвертикальные структуры достигают глубины порядка 20 км и имеют горизонтальные размеры от 3 до 10 км, а глубины проявления подобных тел в Черноморском регионе составляют в основном 10-12 км, в некоторых случаях до 18-20 км и идентифицируются чаще всего как грязевые вулканы. Также имеют место в осадочной толще субвертикальные образования, не достигающие дневной поверхности или дна моря, формируя так называемые «слепые» грязевые вулканы [Шнюков, Коболев, 2020].

Выявленная на Джау-Тепе сверхглубинная структура с максимальным значением относительной интенсивности микросейсмических сигналов, скорее всего, выступает в качестве промежуточной камеры (резервуара) накопления глубинных грязевулканических газов, которые способствуют формированию условий для выдавливания водогрязевой смеси и извержению грязевого вулкана. Математическое описание деятельности грязевых вулканов [Доманский, Ершов, 2011] с питающими системами заполненными газом в нижней и водогрязевой массой в верхней их части показывает, что в результате увеличения давления газов со временем между компетентными элементами устанавливается неустойчивое равновесие, приводящее к вытеснению водогрязевой смеси и извержению грязевого вулкана с выбросом грязебрекчий на поверхность Земли и глубинных газов в атмосферу. После сброса давления в питающем канале запускается процесс наращивания напряжения и подготовки нового извержения.

Низкоскоростное формирование под вулканом Джау-Тепе имеет столбообразную форму. Как видно на горизонтальных срезах, на глубинах 6, 10 и 14 км (рис. 3б) наблюдается расширение формы питающего канала, особенно в нижней глубинной части, за счет внедрения при разгрузке глубинных флюидов во вмещающие породы, имеющие определённую степень разуплотнения из-за изменения плотности и проницаемости среды. Источники таких глубинных газов, питающих многие грязевые вулканы КТПП, находятся за пределами осадочного чехла [Ершов и др., 2015]. Так в спонтанных газах грязевого вулкана Бугазский, были обнаружены образцы с мантийной углеродной меткой [Войтов и др., 2004].

Анализ подводящего канала показывает наличие вторичного очага (область 2) – зоны накопления флюида перед извержением. Особый интерес вызывает промежуток центрального канала на интервале глубин 3.0-3.5 км, соответствующий более высокоскоростным структурам (отрицательные значения относительной интенсивности на разрезе). По нашему мнению, данная область связана с образованием «пробки» из дегидратированной сопочной брекчии. Такое «пережатие» подводящего канала создает условие для образования вторичного очага с подготовкой критически высокого давления. В дальнейшем, прохождение порога прочности «пробки» приведет к пароксизмальному извержению, с выбросом газо-водо-насыщенного вещества и сбросом давления, после чего наступит этап накопления, обогащенного флюидами вещества и давления во вторичном очаге с одновременным отмиранием

вышележащего канала.

Построение объемной структурной модели до глубины 18 км дало возможность существенно уточнить глубинность образования первичного флюидного вещества. Наличие так называемых «глубинных корней» подтверждается резким расширением разуплотненного низкоскоростного участка. Вероятно, эта зона глубже 11 км выступает в качестве термической и газовой подпитки.

Выводы

Реанализ полевых измерений площадной съемки на грязевом вулкане Джау-Тепе, проведенной по методу микросейсмического зондирования, позволил получить новые данные о глубинном строении вулкана:

1. В низкочастотной области микросейсм выявлены сверхглубинные субвертикальные, вероятно, флюидопроводящие неоднородности, ассоциированные с грязевулканическими структурами – основным (главным) резервуаром и проводящим центральным каналом, интерпретируемые на разрезах как области с положительным значением относительной интенсивности.

2. Выявленная столбообразная аномальная структура отчетливо прослеживается под вулканом с отметки 6 км и ниже до глубины 18 км и далее.

3. Определено пространственное положение низкоскоростного участка в подводящем канале и предложена модель цикличного накопления и извержения Джау-Тепе.

4. Выявленная близповерхностная камера, детально рассмотренная в работе [Presnov et al., 2020], и полученные в данной статье новые результаты в совокупности составляют единую питающую систему грязевого вулкана Джау-Тепе.

Литература

1. Бембель Р.М., Мегеря В.М., Бембель С.Р. Геосолитоны: функциональная система Земли, концепция разведки и разработки месторождений углеводородов. Тюмень: Вектор Бук, 2003. – 344 с.
2. Войтов Г.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Пронин А.П., Микадзе Э.И., Науменко-Бондаренко И.И., Пузич И.Н. Эманиационные и изотопно-углеродные нестабильности грифонов газов грязевого вулкана Бугазский и сопряженных с ним тектонических структур (Таманская грязевулканическая провинция). // Доклады академии наук. – 2004. – Т. 394. № 1. – С. 85–88.
3. Горбатилов А.В., Заалишвили В.Б., Харазова Ю.В. Глубинное строение, сейсмичность, тектоника северного фланга Большого Кавказа и Терско-Каспийского прогиба (Северная Осетия) в рамках единой кинематической модели на базе новых геофизических данных. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 33–48. DOI: 10.46698/VNC.2023.44.73.003.
4. Горбатилов А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм. // Физика Земли. – 2008. – № 7. – С. 66–84.
5. Горбатилов А.В., Цуканов А.А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования. // Физика Земли. – 2011. – № 4. – С. 96–112. DOI: 10.1134/S0002333711040077.
6. Доманский А.В., Ершов В.В. Математическое моделирование геофлюидодинамических процессов, протекающих в грязевулканических структурах. // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. № 3. – С. 470–481.
7. Доценко В.В. Вторичная миграция нефти и газов. Ростов-на-Дону: Изд. Южного фе-

дерального университета, 2010. – 48 с.

8. Ершов В.В., Собисевич А.Л., Пузич И.Н. Глубинное строение грязевых вулканов Тамани по данным натурных исследований и математического моделирования. // Геофизические исследования. – 2015. – Т. 16. № 2. – С. 69–76.

9. Рогожин Е.А., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Тверитинова Т.Ю. Структурная позиция и проблемы возникновения очагов грязевого вулканизма в позднеальпийском складчатом сооружении Северо-Западного Кавказа (на примере изучения глубинного строения грязевого вулкана Шуго). // Геология и геофизика Юга России. – 2014. – № 3. – С. 89–115. DOI: 10.23671/VNC.2014.3.55453.

10. Собисевич А.Л., Горбатилов А.В., Овсяченко А.Н. Глубинное строение грязевого вулкана горы Карабетова. // Доклады академии наук. – 2008. – Т. 422. № 4. – С. 542–546.

11. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П. Слепые грязевые вулканы. // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2020. – Т. 16. № 2(60). – С. 49–65. DOI: 10.15407/gpimo2020.02.049.

12. Шнюков Е.Ф., Нетребская Е.Я. Глубинное геологическое строение грязевых вулканов черного моря. // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2014. – № 2(36). – С. 66–79.

13. Шнюков Е.Ф., Нетребская Е.Я. О глубинном строении эруптивного канала грязевых вулканов. // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2016. – № 4(46). – С. 54–66.

14. Якубов А.А., Григорьянц Б.В., Алиев А.А. Грязевой вулканизм Советского Союза и его связь с нефтеносностью. Баку: ЭЛМ, 1980. – 162 с.

15. Gorbatiyov A.V., Rogoghin E.A., Stepanova M.Y., Kharazova Y.V., Sysolin A.I., Rybin A.A., Andreeva N.V. Model of the deep structure of the Elbrus volcano in the light of new geophysical data. // Doklady Earth Sciences. – 2018. – Vol. 480. No. 1. – pp. 642–645. DOI: 10.1134/S1028334X18050136.

16. Jones M.W., Peters G.P., Gasser T., Andrew R.M., Schwingshackl C., Gütschow J., Houghton R.A., Friedlingstein P., Pongratz J., Quéré C.L. National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850. // Scientific Data. – 2023. – Vol. 10. No. 155. DOI: 10.1038/s41597-023-02041-1.

17. Korzhenkov A.M., Ovsyuchenko A.N., Larkov A.S., Kashitsyna O.Yu. Natural geohazards in the Taman peninsula. // Doklady Earth Sciences. – 2024. – Vol. 519. (Suppl 1). – pp. 239–261. DOI: 10.1134/S1028334X2460470X.

18. Lavrushin V.Y., Aydarkozhina A.S., Sokol E.V., Chelnokov G.A., Petrov O.L. Mud volcanic fluids of the Kerch–Taman region: geochemical reconstructions and regional trends: Communication 2. Genesis of Mud Volcanic Gases and Regional Geochemical Trends. // Lithology and Mineral Resources. – 2022. – Vol. 57. No. 1. – pp. 1–24. DOI: 10.1134/S0024490222010059.

19. Mazzini A., Etiope G. Mud volcanism: An updated review. // Earth Science Reviews. – 2017. – Vol. 168. – pp. 81–112. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.03.001.

20. Mazzini A., Sciarra A., Etiope G., Adavarte P., Houweling S., Pandey S., Husein A. Relevant methane emission to the atmosphere from a geological gas manifestation. // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. No. 4138. DOI: 10.1038/s41598-021-83369-9.

21. Popov D.V., Danilov K.B., Zhostkov R.A., Dudarov Z.I., Ivanova E.V. Processing the digital microseism recordings using the Data Analysis Kit (DAK) software package. // Seismic instruments. – 2014. – Vol. 50. No. 1. – pp. 75–83. DOI: 10.3103/S074792391401006X.

22. Presnov D.A., Zhostkov R.A., Likhodeev D.V., Beloborodov D.E., Dudarov Z.I., Dolov S.M. New evidence for the deep structure of the Dzhaub–Tepe mud volcano. // Journal of Volcanology and Seismology. – 2020. – Vol. 14. No. 3. – pp. 166–176. DOI: 10.1134/S0742046320030057.

23. Rogozhin E.A., Gorbatiyov A.V., Stepanova M.Y., Kharazova Y.V., Sysolin A.I., Andreeva N.V., Pogrebchenko V.V., Chervinchuk S.Y., Chen J., Liu J., Ovsyuchenko A.N., Larkov A.S. Deep structure of the northwestern termination of the Caucasus from new geological and geophysical data. // Izvestiya Physics of the Solid Earth. – 2020. – Vol. 56. – pp. 772–788. DOI: 10.1134/

S1069351320060075.

24. Shnyukov E., Yanko-Hombach V. Mud volcanoes of the Black sea region and their environmental significance. Springer. – 2020. – 512 p. DOI: 10.1007/978-3-030-40316-4.

25. Skrypitsyna T.N., Florinsky I.V., Beloborodov D.E., Gaydalenok O.V. Mud volcanism at the Taman peninsula: multiscale analysis of remote sensing and morphometric data. // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12. No. 22. Art. No. 3763. DOI: 10.3390/rs12223763.

References

1. Bembel R.M., Megerya V.M., Bembel S.R. Geosolitons: functional system of the Earth, concept of exploration and development of hydrocarbon deposits. Tyumen. Vector Buk. 2003. 344 p. (In Russ)

2. Voitov G.I., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Pronin A.P., Mikadze E.I., Naumenko-Bondarenko I.I., Puzich I.N. Exhalative and carbon isotope instabilities in gryphon gases from the Bugaz mud volcano and conjugated tectonic structures (Taman mud volcanic province). Doklady Earth Sciences. 2004. Vol. 394. No. 1. pp. 85–885. (In Russ)

3. Gorbatikov A.V., Zaalishvili V.B., Kharazova Yu.V. Deep structure, seismicity, and tectonics of the northern flank of the Greater Caucasus and the Tersk-Caspian trough (North Ossetia) within the framework of a unified kinematic model based on new geophysical data. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 33–48. DOI: 10.46698/VNC.2023.44.73.003. (In Russ)

4. Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu., Korablev G.E. Patterns of microseismic field formation under the influence of local geological heterogeneities and sounding of the environment using microseisms. Physics of the Earth. 2008. No. 7. pp. 66–84. (In Russ)

5. Gorbatikov A.V., Tsukanov A.A. Modeling of Rayleigh waves near scattering velocity inhomogeneities. Investigation of the possibilities of the microseismic sounding method. Physics of the Earth. 2011. No. 4. pp. 96–112. DOI: 10.1134/S0002333711040077. (In Russ)

6. Domansky A.V., Ershov V.V. Mathematical modeling of geofluidodynamic processes occurring in mud volcanic structures. Geology and Geophysics. 2011. Vol. 52. No. 3. pp. 470–481. (In Russ)

7. Dotsenko V.V. Secondary migration of oil and gases. Rostov-on-Don. Southern Federal University. 2010. 48 p. (In Russ)

8. Ershov V.V., Sobisevich A.L., Puzich I.N. The deep structure of mud volcanoes of Taman according to field studies and mathematical modeling. Geophysical Research. 2015. Vol. 16. No. 2. pp. 69–76. (In Russ)

9. Rogozhin E.A., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Tveritinova T.Y. Structural position and problems of occurrence of mud volcanism foci in the Late Alpine folded structure of the Northwestern Caucasus (on the example of studying the deep structure of the Shugo mud volcano). Geology and Geophysics of Russian South. 2014. No. 3. pp. 89–115. DOI: 10.23671/VNC.2014.3.55453. (In Russ)

10. Sobisevich A.L., Gorbatikov A.V., Ovsuchenko A.N. The deep structure of the mud volcano of Mount Karabetova. Doklady Earth Sciences. 2008. Vol. 422. No. 4. pp. 542–546. (In Russ)

11. Shnyukov E.F., Kobolev V.P. Blind mud volcanoes. Geology and minerals of the World Ocean. 2020. Vol. 16. No. 2(60). pp. 49–65. DOI: 10.15407/gpimo2020.02.049. (In Russ)

12. Shnyukov E.F., Netrebskaya E.Ya. Deep geological structure of mud volcanoes of the Black Sea. Geology and minerals of the World Ocean. 2014. No. 2(36). pp. 66–79. (In Russ)

13. Shnyukov E.F., Netrebskaya E.Ya. On the deep structure of the eruptive channel of mud volcanoes. Geology and minerals of the World Ocean. 2016. No. 4(46). pp. 54–66. (In Russ)

14. Yakubov A.A., Grigoryants B.V., Aliev A.A. Mud volcanism of the Soviet Union and its relation to oil production. Baku. ELM. 1980. 62 p. (In Russ)

15. Gorbatikov A.V., Rogozhin E.A., Stepanova M.Y., Kharazova Y.V., Sysolin A.I., Rybin

A.A., Andreeva N.V. Model of the deep structure of the Elbrus volcano in the light of new geophysical data. *Doklady Earth Sciences*. 2018. Vol. 480. No. 1. pp. 642–645. DOI: 10.1134/S1028334X18050136.

16. Jones M.W., Peters G.P., Gasser T., Andrew R. M., Schwingshackl C., Gütschow J., Houghton R.A., Friedlingstein P., Pongratz J., Quéré C.L. National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850. *Scientific Data*. 2023. Vol. 10. No. 155. DOI: 10.1038/s41597-023-02041-1.

17. Korzhenkov A.M., Ovsyuchenko A.N., Larkov A.S., Kashitsyna O. Yu. Natural geohazards in the Taman peninsula. *Doklady Earth Sciences*. 2024. Vol. 519. (Suppl 1). pp. 239–261. DOI: 10.1134/S1028334X2460470X.

18. Lavrushin V.Y., Aydarkozhina A.S., Sokol E.V., Chelnokov G.A., Petrov O.L. Mud volcanic fluids of the Kerch–Taman Region: geochemical reconstructions and regional trends: Communication 2. Genesis of Mud Volcanic Gases and Regional Geochemical Trends. *Lithology and Mineral Resources*. 2022. Vol. 57. No. 1. pp. 1–24. DOI: 10.1134/S0024490222010059.

19. Mazzini A., Etiope G. Mud volcanism: An updated review. *Earth Science Reviews*. 2017. Vol. 168. pp. 81–112. DOI: 10.1016/J.EARSCIREV.2017.03.001.

20. Mazzini A., Sciarra A., Etiope G., Adavarte P., Houweling S., Pandey S., Husein A. Relevant methane emission to the atmosphere from a geological gas manifestation. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. No. 4138. DOI: 10.1038/s41598-021-83369-9.

21. Popov D.V., Danilov K.B., Zhostkov R.A., Dudarov Z.I., Ivanova E.V. Processing the digital microseism recordings using the Data Analysis Kit (DAK) software package. *Seismic instruments*. 2014. Vol. 50. No. 1. pp. 75–83. DOI: 10.3103/S074792391401006X.

22. Presnov D.A., Zhostkov R.A., Likhodeev D.V., Beloborodov D.E., Dudarov Z.I., Dolov S.M. New evidence for the deep structure of the Dzhau-Tepe mud volcano. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2020. Vol. 14. No. 3. pp. 166–176.

23. Rogozhin E.A., Gorbatiykov A.V., Stepanova M.Y., Kharazova Y.V., Sysolin A.I., Andreeva N.V., Pogrebchenko V.V., Chervinchuk S.Y., Chen J., Liu J., Ovsyuchenko A.N., Larkov A.S. Deep structure of the northwestern termination of the Caucasus from new geological and geophysical data. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*. 2020. Vol. 56. pp. 772–788. DOI: 10.1134/S1069351320060075.

24. Shnyukov E., Yanko-Hombach V. Mud volcanoes of the Black sea region and their environmental significance. Springer. 2020. 512 p. DOI: 10.1007/978-3-030-40316-4.

25. Skrypitsyna T.N., Florinsky I.V., Beloborodov D.E., Gaydalenok O.V. Mud volcanism at the Taman peninsula: multiscale analysis of remote sensing and morphometric data. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. No. 22. Art. No. 3763. DOI: 10.3390/rs12223763.

УДК 539.3:550.343

DOI: 10.46698/VNC.2025.96.62.001

Оригинальная статья

К задачам теории «вирусов» вибропрочности в сейсмологии

И.С. Телятников^{1,2}, А.В. Павлова²

¹ Южный научный центр РАН, Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону,
пр. Чехова, 41, e-mail: ilux_t@lisl.ru;

² Кубанский государственный университет, Россия, 350040, г. Краснодар,
ул. Ставропольская, 149

Статья поступила: 25.03.2025, доработана: 30.05.2025, принята к публикации: 04.06.2025

Резюме: Актуальность работы. Задачи теории упругости и математической физики для тел с разрезами нулевой толщины вызывают интерес в связи с многочисленными приложениями, в том числе в геофизике и сейсмологии. Круг геофизических задач, решаемых с использованием математических моделей деформируемых сред, содержащих дефекты типа трещин, очень широк. В сейсморазведке применение таких моделей позволяет учитывать наличие неоднородностей, что дает возможность повысить точность интерпретации натурных экспериментов. Интенсивно развиваемые методы моделирования динамических процессов в системах, включающих основания с расслоениями, находят применение при решении актуальных проблем виброзондирования слоистых геологических пород, нефтедобычи и пр. При этом решение прямых задач расчета волновых полей, возбуждаемых внутренними источниками в деформируемой среде, является неизбежным этапом решения задач обнаружения и идентификации скрытых неоднородностей. **Цель работы** – развитие полуаналитических методов решения задач для слоистых структур, содержащих внутренние трещины. **Методы исследования.** В качестве уравнений движения сплошной среды приняты уравнения Ламе в перемещениях, поставлена граничная задача с разрывными граничными условиями в области дефектов. Метод блочного элемента использован для построения порождаемой задачей системы интегральных уравнений, для решения последних использован метод фиктивного поглощения. **Результаты работы.** Представлен полуаналитический метод исследования вызывающих особый интерес локализационных и резонансных эффектов, связанных со спектральными свойствами задач для слоистых структур с трещинами.

Ключевые слова: моделирование геологической среды, слоистая структура, планарные трещины, метод блочного элемента, система интегральных уравнений, метод фиктивного поглощения, условия локализации.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кубанского научного фонда в рамках проекта № 24-21-20032.

Для цитирования: Телятников И.С., Павлова А.В. К задачам теории «вирусов» вибропрочности в сейсмологии. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 116-127. DOI: 10.46698/VNC.2025.96.62.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.96.62.001

Original paper

On the problems of the theory of vibration-strength “viruses” in seismology

I.S. Telyatnikov^{1,2}, A.V. Pavlova²

¹ Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Ave., Rostov-on-Don 344006, Russian Federation, e-mail: ilux_t@lisl.ru;

² Kuban State University, 149 Stavropolskaya Str., Krasnodar 350040, Russian Federation

Received: 25.03.2025, revised: 30.05.2025, accepted: 04.06.2025

Abstract: Relevance. The problems of elasticity theory and mathematical physics for bodies with zero-thickness cuts present a great interest and have numerous applications, including those in geophysics and seismology. The spectrum of geophysical problems solved using mathematical models of deformable media containing defects such as cracks is very broad. In seismic exploration, the use of such models allows us to take into account the presence of heterogeneities, which makes it possible to increase the accuracy of the field experiments interpretation. Intensively developed methods for modeling dynamic processes in systems including foundations with discontinuities are used to solve topical problems in vibration sounding of layered geological formations, oil extraction, etc. At the same time, the solution of direct problems of calculating wave fields excited by internal sources in a deformable medium is an inevitable stage in solving problems of detecting and identifying hidden inhomogeneities. **Aim.** The aim of the work is to develop semi-analytical methods for solving problems for layered structures containing internal cracks. **Methods.** As equations for motion of a continuous medium we have adopted Lamé equations in displacements and formulated boundary problem with discontinuous boundary conditions in the defect area. The block element method has been used to construct the system of integral equations for the problem, and the fictitious absorption method has been used to solve the latter. **Results.** A semi-analytical method is presented for studying localization and resonance effects of particular interest, associated with the spectral properties of problems for layered structures with cracks.

Keywords: modeling of geological environment, layered structure, planar cracks, block element method, system of integral equations, fictitious absorption method, localization conditions.

Acknowledgment: This work was financially supported by the Russian Science Foundation and the Kuban Science Foundation under project No. 24-21-20032.

For citation: Telyatnikov I.S., Pavlova A.V. On the problems of the theory of vibration-strength “viruses” in seismology. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 116-127. DOI: 10.46698/VNC.2025.96.62.001

Введение

Активное использование инструментальных методов управляемой активной сейсмологии, направленных на изучение внутренней структуры Земли, ставит немало задач, решение которых требует развития механико-математических моделей и совершенствования методов их исследования [Изменение ..., 2008]. Для Северного Кавказа, являющегося одним из наиболее сейсмоопасных регионов России [Стогний и др., 2022], эти проблемы особенно актуальны.

При моделировании геологической среды широкое распространение получила модель слоистого упругого полупространства с плоскопараллельными границами

или пакета слоев [Собисевич и др., 2020]. Сопоставление результатов использования этой модели с данными мониторинга позволяет получать и интерпретировать сведения о процессах возбуждения и распространения сейсмических волн в результате воздействий поверхностных и заглубленных источников различной природы. Поэтому исследование взаимодействия упругих волн с границами раздела в многослойных средах и влияние границ на их поведение находит широкое применение в геофизике и сейсмологии. При этом часто используется классическое граничное условие идеального (жесткого) соединения для поверхности раздела, характеризующееся непрерывностью перемещений и напряжений на границах раздела.

Кроме того, распространенные в реальной среде полости, трещины и другие неоднородности различного размера и природы активно развиваются в литосфере сейсмоопасных регионов, меняя пространственную картину формируемых волновых полей и влияя на локальные и глобальные резонансные свойства отдельных образований горной породы. С такими дефектами нередко связывают крупные сейсмические события, являющиеся источниками геофизических катастроф [Собисевич и др., 2020]. В настоящее время исследованию различных аспектов динамики сред, содержащих трещины, посвящено большое количество работ как зарубежных, так и отечественных авторов, демонстрирующих разнообразные подходы [Бабешко, 2000; Komatitsch, Tromp, 1999; Ceeseman, Santare, 2002; Ватульян, Баранов, 2005; Кардовский и др., 2004; Пряхина, Смирнова, 2005; Shifrin, 2015; Глушков и др., 2006; Собисевич, 2010; Стогний и др., 2020].

Одна из часто применяемых математических моделей трещины – математический разрез. Для трещины нулевой толщины используют различные граничные условия на ее берегах: раскрытая трещина, трещина с заданными на берегах напряжениями, трещины с равномерно и неравномерно распределенными внутренними связями.

В работах В.А. Бабешко проведена систематизация различных типов неоднородностей и сформулированы положения теории «вирусов» вибропрочности. Для дефектов типа трещин, одиночных и множественных, расположенных в параллельных плоскостях, в работах [Бабешко, 2000; Кардовский и др., 2004; Пряхина, Смирнова, 2005; Telyatnikov, Pavlova, 2023] представлены методы исследования задач в рамках указанной теории. Получение решения интегральных уравнений в полуаналитической форме сокращает вычислительные затраты.

Внутренние неоднородности могут приводить к перераспределению напряжений и деформаций в массиве и земной коре [Заалишвили, Голик, 2024]. А влияние на геологическую среду различных видов вибраций, в том числе техногенных, может приводить к возникновению возбужденной сейсмичности [Изменение ..., 2008].

В работе рассматриваются задачи об установившихся колебаниях слоистой структурированных сред, содержащих планарные трещины, результаты исследования которых могут быть использованы при моделировании воздействий на геологическую среду широко распространенных длительных вибраций.

Исследование направлено на изучение закономерностей вибрации трещин и развитие методов решения задач, описывающих эти процессы. Особый интерес вызывает изучение локализационных и резонансных эффектов, связанных со спектральными свойствами задач для слоистых структур с трещинами. В работе продемонстрирован подход к решению задач для слоистых структур с планарными

трещинами на основе теории «вирусов» вибропрочности и применения факторизационных методов.

Общая постановка задачи

Слоистость – один из признаков, свойственных осадочным и метаморфическим комплексам горных пород. Геологическое строение среды в сейсмически активных областях нередко представлено сложными многослойными разрезами, но в тех случаях, когда геологический разрез местности относительно прост в смысле геометрии напластования пород и рельефа местности, модель верхней части земной коры можно представить в виде системы плоскопараллельных горизонтальных слоев. Изучаемая краевая задача для пакета из N слоев с защемленной нижней гранью описывается уравнениями Ламе относительно перемещений. В декартовой системе координат плоскость x_1Ox_2 параллельна поверхности пакета ($x_3 = h_{N+1} \geq 0, -\infty < x_1, x_2 < +\infty$), ось Ox_3 направлена перпендикулярно вверх. Упругие характеристики слоев, ограниченных плоскостями $x_3 = h_k, x_3 = h_{k+1}$ ($k = \overline{1, N}$), обозначены через λ_k, μ_k , плотность – ρ_k . Время входит в формулировку задачи в качестве параметра. Для установившихся гармонических колебаний принята комплексная форма записи и все функции представимы в виде:

$$f(\mathbf{x}, t) = \operatorname{Re}[\tilde{f}(\mathbf{x})e^{-i\omega t}], \mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3),$$

и далее изложение проводится для амплитудных параметров, тильда опущена. Определяющие уравнения имеют вид:

$$(\lambda_j + \mu_j)\operatorname{grad}(\operatorname{div}\mathbf{u}_j) + \mu_j\Delta\mathbf{u}_j = -\omega^2\rho_j\mathbf{u}_j, j = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Здесь для перемещений при $x_3 \rightarrow h_k \pm 0$ введены обозначения $\mathbf{u}_k^\pm = \{\mathbf{u}_{km}^\pm\}$, $m = \overline{1, 3}$, для векторов напряжений – $\boldsymbol{\tau}_k^\pm = \{\tau_{km}^\pm\}$, $\boldsymbol{\tau}_k(x_1, x_2, h_k) = \{\sigma_{ij}n_j\}|_{x_3=h_k}$, где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, n_j – составляющие вектора нормали к площадке.

Будем полагать, что на поверхности среды в заданной конечной области Ω_{N+1} действует гармонический источник, в интерфейсных плоскостях содержатся плоские трещины, занимающие непересекающиеся односвязные области Ω_{jk} , $j = \overline{1, N_k}$. Наличие трещин и расслоений при использовании модели слоистой протяженной среды описывается заданием в области дефектов разрывного условия для перемещений, вне областей дефектов задается абсолютный контакт слоев (непрерывность полей напряжений и перемещений).

Граничные условия запишутся в форме:

$$\hat{x}_3 = h_{N+1}: \mathbf{u}_{N+1} = \mathbf{u}_{N+1}^0, (x_1, x_2) \in \hat{\Omega}_{N+1}; \boldsymbol{\tau}_{N+1} = \mathbf{0}, (x_1, x_2) \notin \Omega_{N+1}; \quad (2)$$

$$x_3 = h_1: \mathbf{u}_1 = \mathbf{0}, -\infty < x_1, x_2 < +\infty; \quad (3)$$

$$x_3 = h_k: \boldsymbol{\tau}_{jk} = \boldsymbol{\tau}_{jk}^+ = \boldsymbol{\tau}_{jk}^-, (x_1, x_2) \in \Omega_{jk};$$

$$\mathbf{u}_{jk}^* = \mathbf{u}_{jk}^+ - \mathbf{u}_{jk}^- = \mathbf{0}, (x_1, x_2) \notin \bigcup_{j=1}^{N_k} \Omega_{jk}, j = \overline{1, N_k}. \quad (4)$$

Во избежание неоднозначности решения задачи об установившихся колебаниях в качестве условия излучения выбирается принцип предельного поглощения [Ворович, Бабешко, 1979].

Воспользуемся методом блочного элемента (МБЭ) [Babeshko et al., 2013], выделив в пакете слои-блоки. В результате реализации алгоритма МБЭ для задачи (1)–(4) приходим к системе интегральных уравнений (СИУ) в плоскостях раздела слоев:

$$\sum_{l=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N_l} \mathcal{K}_{nl}(\Omega_{jl+1}) \mathbf{u}_{jl+1}^* + \mathcal{K}_{nN}(\Omega_{N+1}) \boldsymbol{\tau}_{N+1} = \boldsymbol{\tau}_{mn+1}, \quad (5)$$

$$x_3 = h_{n+1}, (x_1, x_2) \in \Omega_{mn+1}, m = \overline{1, N}, n = \overline{1, N-1};$$

$$\sum_{l=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N_l} \mathcal{K}_{Nl}(\Omega_{jl+1}) \mathbf{u}_{jl+1}^* + \mathcal{K}_{NN}(\Omega_{N+1}) \boldsymbol{\tau}_{N+1} = \mathbf{u}_{N+1}^0, \quad (6)$$

$$x_3 = h_{N+1}, (x_1, x_2) \in \Omega_{N+1}.$$

Неизвестными в (5), (6) являются скачки перемещений в областях трещин $\mathbf{u}_{jl+1}^*$ и напряжения под штампом на поверхности $\boldsymbol{\tau}_{N+1}$. Интегральные операторы имеют вид:

$$\mathcal{K}_{nl}(\Omega_{jl+1}) \mathbf{u}_{jl+1}^* = \iint_{\Omega_{jl+1}} \mathbf{k}_{nl}(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) \mathbf{u}_{jl+1}^*(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2,$$

где ядра зависят от частоты и параметров системы и представляются

$$\mathbf{k}_{ij}(x_1, x_2) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{\Gamma_1} \int_{\Gamma_2} \mathbf{K}_{ij}(\alpha_1, \alpha_2) e^{-i(x_1 \alpha_1 + x_2 \alpha_2)} d\alpha_1 d\alpha_2.$$

Положение контуров Γ_1, Γ_2 в комплексной плоскости определяется принципом предельного поглощения [Ворович, Бабешко, 1979], структура матриц $\mathbf{K}_{ij}$ приведена в работе [Pavlova, Telyatnikov, 2019].

Методы построения символов и матриц-символов интегральных уравнений (ИУ) и СИУ задач для сред с единичными и множественными трещинами и их решения рассмотрены также в работах [Ткачев, 1979; Кардовский и др., 2004; Пряхина, Смирнова, 2005; Собисевич, 2010; Pavlova, Telyatnikov, 2019; Telyatnikov, Pavlova, 2023]. При решении трехмерных задач о колебаниях структур с трещинами зачастую используют метод граничных интегральных уравнений, где для отыскания скачка перемещений применяется метод Галеркина [Глушков, Глушкова, 1996; Bostrom, 2003].

Особенностью ИУ, возникающих при моделировании среды, содержащей трещины, является растущий характер символов ядер на бесконечности, вследствие чего ядра представляются обобщенными функциями. В работе [Ткачев, 1979] регуляризация систем интегральных уравнений первого рода проведена с помощью факторизации функций и матриц-функций, авторами [Пряхина, Смирнова, 2005; Telyatnikov, Pavlova, 2023] использован метод фиктивного поглощения (МФП), описанный в монографии [Бабешко, 1984]. Следуя примененному в работах В.А. Бабешко приему, осуществляется преобразование интегральных операторов за счет выноса дифференциального оператора $\Delta - \Lambda^2, \Lambda = \text{const}$, и формулировки дополнительных условий для устранения неопределенности в решении исходных ИУ. В качестве дополнительных ограничений, накладываемых на решения, принимаются условия равенства нулю скачков перемещений на границах областей, занятых трещинами. Для СИУ с преобразованным оператором может быть применен метод фиктивного поглощения (МФП), различные модификации которого описаны в работах [Кардовский и др., 2004; Пряхина, Смирнова, 2005; Telyatnikov, Pavlova, 2023].

Представим матрицу-символ ядра СИУ $\mathbf{K} = \|\mathbf{K}_{ij}\|$

$$\mathcal{K}(\Omega) \mathbf{q} = \mathbf{f} \quad (7)$$

в виде $\mathbf{K} = \mathbf{K}_0 \mathbf{\Pi}$, $\mathbf{\Pi}(\alpha_1, \alpha_2) \approx \mathbf{E} + \mathbf{O}(\alpha^{-1})$, где $\mathbf{E}$ – единичная матрица, $\mathbf{K}_0$ соответствует задачам для сред с затуханием. Асимптотические свойства элементов и определителей $\mathbf{K}$ и $\mathbf{K}_0$ совпадают при $\alpha \rightarrow 0$, отличием для $\mathbf{K}_0$ является отсутствие

особенностей на вещественной оси [Ворович, Бабешко, 1979]. На вещественных осях построим аппроксимации элементов матриц $\Pi(\alpha_1, \alpha_2)$, $\Pi^{-1}(\alpha_1, \alpha_2)$ рациональными функциями, $\Pi^{\pm 1}(\alpha_1, \alpha_2) \approx \Pi_*^{\pm 1}(\alpha_1, \alpha_2)$, $\Pi_* = \|P_{ij}\|$, $\Pi_*^{-1} = \|M_{ij}\|$, обозначив D_{ij} и Z_{ij} полярные множества P_{ij} и M_{ij} соответственно. Используя теорему теории возмущений [Бабешко, 1984], для построения приближенного решения (7) будем рассматривать СИУ:

$$\mathcal{K}^*(\Omega)q = f, K^* = K_0\Pi^*.$$

Далее символ «*» опущен.

Алгоритм МФП предполагает представление решения в виде $q(x_1, x_2) = p(x_1, x_2) + \varphi(x_1, x_2)$, где $V_2\varphi = V_2q$. Здесь и далее использованы обозначения $V_n^{\pm 1}$ для операторов прямого и обратного преобразования Фурье порядка n . Тогда $V_2(\alpha_1, \alpha_2)q_k = 0$ на множествах D_{jk} .

Используя по схеме метода новую неизвестную $t(x_1, x_2) = V^{-1}\Pi V p(x_1, x_2)$, для нее получим:

$$t(x_1, x_2) = \mathcal{K}_0^{-1}f - \varphi - \mathcal{K}_0^{-1}S\varphi,$$

где матрица-символ ядра оператора S имеет вид $K_0(\Pi - E)$.

Тогда решение (7) получим в следующем виде:

$$q(x_1, x_2) = \mathcal{K}_0^{-1}f - \mathcal{K}_0^{-1}S\varphi + V^{-1}(\Pi^{-1} - E)V(\mathcal{K}_0^{-1}f - \varphi - \mathcal{K}_0^{-1}S\varphi).$$

Из совпадения носителей вектор-функций $p(x_1, x_2)$ и $t(x_1, x_2)$ вытекает условие [Бабешко, 1984]:

$$V(\mathcal{K}_0^{-1}f - \varphi - \mathcal{K}_0^{-1}S\varphi) = 0, (\alpha_1, \alpha_2) \in Z_{ij}. \quad (8)$$

Решение интегрального уравнения для одиночной трещины

Встречаются случаи, когда в колебательном процессе, в который вовлечены большие объемы горной породы, предпочтение должно быть отдано локальным структурам, формирующим источники возмущений [Собисевич и др., 2020]. Большое число работ посвящено численному решению задач для деформируемых структур с одиночной трещиной. В рассматриваемых в данной работе моделях не учитывается возможность контакта берегов трещины. Подходы, основанные на модели контактной зоны [England, 1965], преодолевают проблему взаимопроникновения берегов трещины, однако зона взаимопроникновения обычно мала по сравнению с длиной трещины [Erdogan, 1963].

Приведем ИУ осесимметричной задачи для одного слоя-блока, содержащего трещину отрыва в плоскости, параллельной границам:

$$\mathcal{K}q = \int_0^a k_n(r, \rho) u^*(\rho) \rho d\rho = f(r), 0 \leq r \leq a, r^2 = x_1^2 + x_2^2,$$

$$k_n(r, \rho) = \int_{\Gamma_0} K(\alpha) J_n(\alpha r) J_n(\alpha \rho) \alpha d\alpha, \alpha^2 = \alpha_1^2 + \alpha_2^2,$$

где $K(\alpha) \sim C\alpha(1 + O(\alpha^{-1}))$, $C = \text{const}$, при $\alpha \rightarrow \infty$. Контур Γ_0 представляет собой часть контура Γ , лежащую в правой полуплоскости, J_n – функция Бесселя первого рода [Справочник ..., 1979].

Для получения ИУ с убывающим символом ядра вынесем из обеих частей оператор вида $-L_n + \Lambda^2$, где $L_n = -\left(\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d}{dr}\right) - \frac{n^2}{r^2}\right)$. В результате получим:

$$\int_0^a k_1(r, \rho) u^*(\rho) \rho d\rho = \int_0^a f(\rho) \rho \int_0^\infty \frac{J_n(\alpha r) J_n(\alpha \rho)}{\alpha^2 + \Lambda^2} \alpha d\alpha d\rho + \varepsilon(r),$$

$$\varepsilon(r) = C_1 I_n(\Lambda r) + C_2 K_n(\Lambda r), \quad (9)$$

где I_n – функция Инфеляда, K_n – функция Макдональда.

В силу неограниченности функции Макдональда [Справочник ..., 1979] при $r = 0$, следует положить $C_2 = 0$. Тогда ИУ (9) запишется в виде:

$$\int_0^a k_1(r, \rho) u^*(\rho) \rho d\rho = K_n(\Lambda r) \int_0^r f(\rho) I_n(\Lambda \rho) \rho d\rho +$$

$$+ I_n(\Lambda r) [C_1 + \int_r^a f(\rho) K_n(\Lambda \rho) \rho d\rho],$$

где C_1 подлежит определению из условия равенства нулю раскрытия трещины на краю (при $r = a$).

Последнее ИУ, не нарушая общности, решается для $f(r) = J_n(\eta r)$, так как произвольную функцию можно представить в виде разложения в ряд по функциям Бесселя.

В работе [Telyatnikov, Pavlova, 2023] предложен следующий вид функций φ :

$$\varphi(r) = \sum_{k=1}^N G_k(L_n) D_k \delta(r - a),$$

$$G_k(\alpha^2) = (\alpha^2 - p_1^2) \cdots (\alpha^2 - p_{k-1}^2) (\alpha^2 - p_{k+1}^2) \cdots (\alpha^2 - p_N^2),$$

где p_k составляют полярное множество $K(\alpha)$, D_k – постоянные, определяемые впоследствии из условия (8).

Обсуждение результатов

Наличие в деформируемой среде неоднородностей при некоторых условиях приводит к локализации волнового процесса и возникновению резонансов в условиях вибрации, этот эффект может наблюдаться как для множественных отслоений, так и для одиночной трещины. Но присутствие системы трещин усложняет обнаружение таких дефектов: если одиночная трещина, как правило, экспериментально поддается локации, то совокупность дефектов может сильно рассеивать падающий сигнал.

Условия локализации обусловлены наличием у оператора соответствующей краевой задачи определенных спектральных свойств и сформулированы в виде теорем в работе [Бабешко, 2000].

Теорема [Бабешко, 2000]: Пусть для заданного вируса параметры задачи таковы, что имеет место равенство:

$$Q_0(\alpha_1, \alpha_2) = 0 \text{ при } \alpha = \sqrt{\alpha_1 + \alpha_2} = z_k, k = 1, \dots, m, \quad (10)$$

тогда «вирус» локализует волновой процесс в своей окрестности.

Здесь z_k образуют корневое множество $\det K(\alpha_1, \alpha_2, \omega)$; вектор-функция $Q_0(\alpha_1, \alpha_2)$ – решение СИУ, которую можно получить из (5), (6) путем замены матрицы Фурье символа ядра на вариант задачи для среды с сильным затуханием K_0 .

Развивая теоретические построения в рамках затронутой проблемы, построение условий (10) требует определения корневого множества $\det K$. Используя символы $K_{ij}(\alpha_1, \alpha_2)$ блочной матрицы K описанной задачи для пакета слоев с фиксированной нижней гранью и действующим на поверхности штампом, можно получить аналитические представления $\det K$. Корневое множество $\det K$ включает полярные множества определителей матриц-символов Грина однородных слоев с параметрами первого и последнего слоев с условием (3) на нижней границе и полярные множе-

ства определителей матриц-символов Грина однородных слоев со свободной верхней границей с характеристиками внутренних слоев, что полностью согласуется с результатами, полученными в работах [Пряхина, Смирнова, 2006, 2012].

На рисунке 1 представлены кривые полюсов и нулей элементов и определителей матриц для задачи о колебаниях среды с трещинами в интерфейсных плоскостях. Так рисунок 1а иллюстрирует нули и полюсы элемента $K_{33}(\alpha)$ в случае одиночной трещины в интерфейсной плоскости двухслойного пакета, рисунку 1б соответствует трехслойный пакет с трещиной между вторым и третьим слоями (коэффициенты Пуассона $\nu_j = 0,28, j = \overline{1,3}$). Толщины слоев приведены в безразмерных величинах (для обоих случаев $H_1 = H_2 = 0,5, H_3 = 1$), нижняя граница пакета защемлена, верхняя – свободна от нагрузок. На рисунке 1с приведены нули и полюсы определителя матрицы $\mathbf{K}$ пакета из двух слоев со свободной поверхностью и интерфейсной трещиной ($H_1 = H_2 = 0,5, H_3 = 1$), а на 1d – определителя матрицы $\mathbf{K}$ для четырехслойной среды, с нагруженной верхней гранью ($H_1 = H_4 = 0,5, H_2 = H_3 = 0,2$). Трещины в пакете расположены между первым и вторым, а также между третьим и четвертым слоями.

Всюду на графиках черными сплошными линиями обозначены полюсы, а пунктиром – нули (синим – однократные, красным – двукратные). По оси абсцисс отложена приведенная частота колебаний $\bar{\omega} = \omega l \sqrt{\frac{\rho_N}{\mu_N}}$ (ω – частота колебаний, l – размерный линейный параметр, ρ_N, μ_N – плотность и модуль сдвига верхнего слоя), по оси ординат – параметр преобразования Фурье.

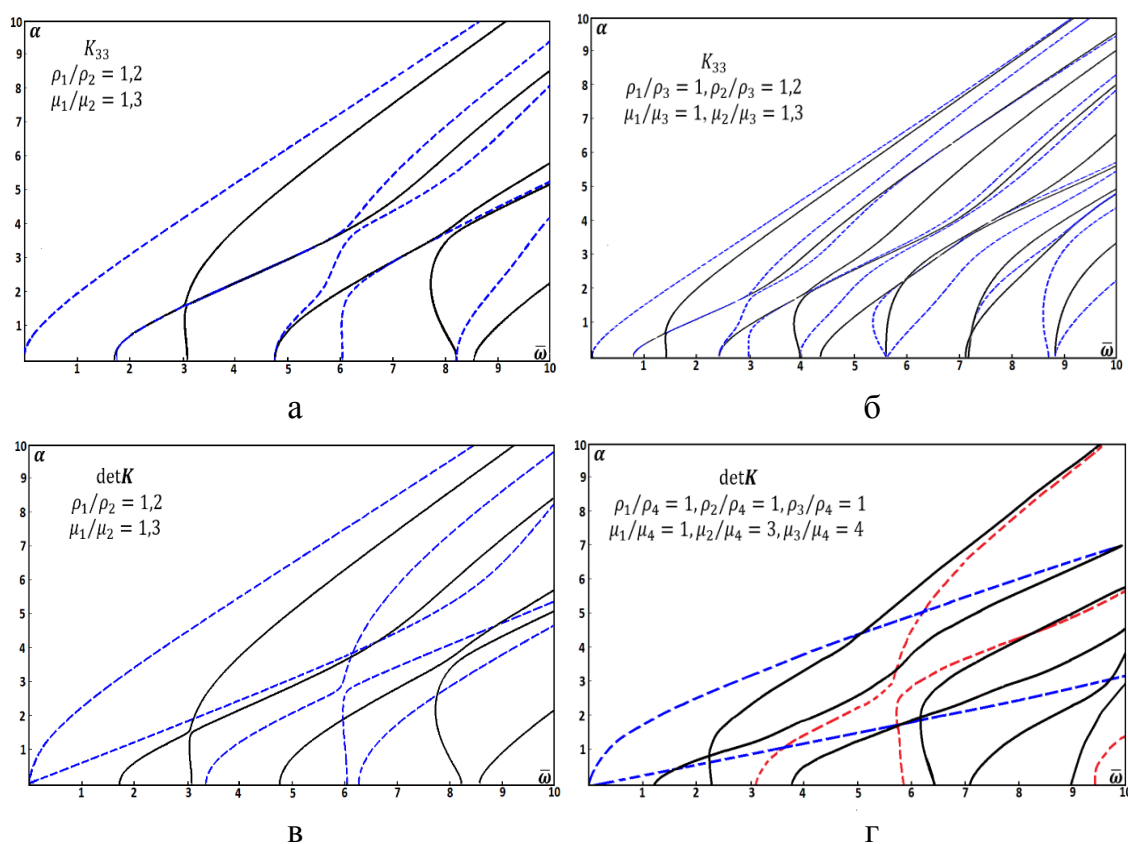


Рис. 1. Нули и полюсы элементов и определителей матриц-символов /

Fig. 1. Zeros and poles of elements and determinants of matrix symbols

В работе [Собисевич, 2010] рассматривалась задача об установившихся колебаниях точек упругого однородного полупространства в случае, когда сейсмогравитационный процесс формируется вибрацией берегов круглой в плане трещины, рассчитаны дисперсионные характеристики для различных параметров среды.

Описанный в настоящей работе подход позволяет на основе рассчитанных нулей и полюсов для слоистых сред найти скачки перемещений на берегах трещин как решения СИУ. На рисунке 2 приведены вещественные части комплексных амплитуд раскрытия круглой интерфейсной трещины в двухслойном пакете ($H_1 = 0,6, H_2 = 0,4, \nu_j = 0,3$ ($j = 1,2$), $\mu_1/\mu_2 = 0,5, a = 2, \rho_1/\rho_2 = 1, \bar{\omega} = 4$) для $f(r) = J_0(\eta r)$ при разных значениях параметра η .

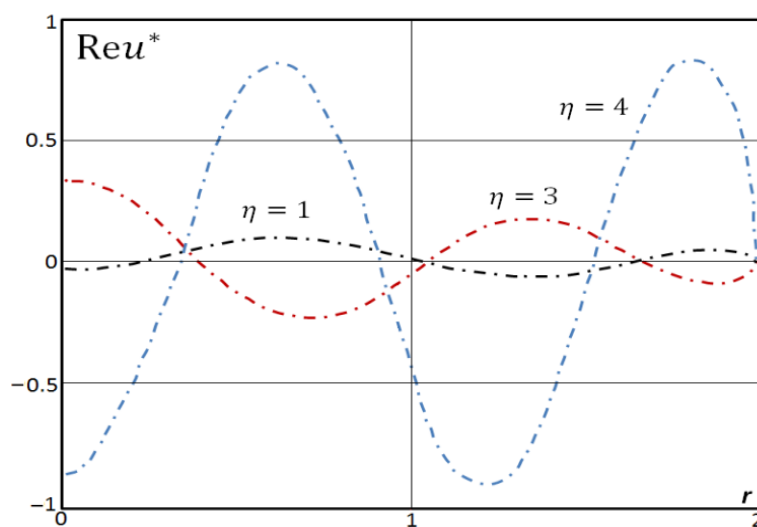


Рис. 2. Вещественная часть скачка перемещений на берегах круглой трещины /

Fig. 2. The real part of the jump in displacements on the banks of a circular crack

Выводы

В настоящее время активно развиваются новые вибрационные геотехнологии, требующие теоретического обоснования на основе методов математического моделирования. В работе исследованы механико-математические модели геологических материалов, описывающие упругие колебания слоистых структур с планарными трещинами.

Ключевым вопросом в исследовании задач для слоистых оснований с нарушениями сплошности межслойного контакта является построение и решение порождаемых ими интегральных уравнений и систем интегральных уравнений. Используемый в работе алгоритм построения СИУ смешанных задач основан на формализме МБЭ.

Предложенные подходы дают возможность изучить процессы вибрации слоистых структур, генерируемых осциллирующими нагрузками на поверхности и внутренних неоднородностях для различных физико-механических и геометрических характеристик составляющих их слоев-блоков.

Литература

1. Бабешко В.А. Обобщенный метод факторизации в пространственных динамических смешанных задачах теории упругости. М.: Наука, 1984. – 265 с.

2. Бабешко В.А. Среды с неоднородностями (случай совокупности включений и трещин). // Известия РАН. МТТ. – 2000. – Т. 373. № 3. – С. 5–9.
3. Ватульян А.О., Баранов И.В. Об определении конфигурации трещины в анизотропной упругой среде. // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51. № 4. – С. 456–462.
4. Ворович И.И., Бабешко В.А. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М.: Наука, 1979. – 320 с.
5. Глушков Е.В., Глушкова Н.В. Дифракция упругих волн на пространственных трещинах произвольной в плане формы. // Прикладная математика и механика. – 1996. – Т. 60. № 2. – С. 282–289.
6. Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Голуб М.В. Блокирование и локализация энергии в упругих слоистых волноводах с дефектами. // Акустический журнал. – 2006. – Т. 52. № 3. – С. 314–325.
7. Заалишвили В.Б., Голик В.И. Геофизическое обеспечение горного производства. // Геология и Геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 3. – С. 85–98. DOI: 10.46698/t6803-6487-0430-d.
8. Изменение окружающей среды и климата: в 8 томах. / Редакционно-издательский совет: Н.П. Лаверов и др. – М.: ИФЗ РАН. Т. 1: Сейсмические процессы и катастрофы. – 2008. – 404 с.
9. Кардовский И.В., Пряхина О.Д., Смирнова А.В. Решение динамической задачи для трехслойной среды с трещинами. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2004. – №3. – С. 38–43.
10. Пряхина О.Д., Смирнова А.В. Интегральные уравнения динамических задач для многослойных сред, содержащих систему трещин. // Прикладная математика и механика. – 2005. – Т. 69. Вып. 2. – С. 345–351.
11. Пряхина О.Д., Смирнова А.В. Построение определителей матриц-символов Грина трехслойных сред с дефектами различной природы. // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2012. – Т. 9. № 2. – С. 56–63.
12. Пряхина О.Д., Смирнова А.В. Построение определителей матриц-символов Грина многослойных сред с дефектами на основе теории «вирусов» вибропрочности. // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2006. – Т. 3. № 2. – С. 44–54.
13. Собисевич А.Л. Избранные задачи математической геофизики и вулканологии. М.: ИФЗ РАН, 2010. – 464 с.
14. Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л., Фатьянов А.Г. Длиннопериодные сейсмогравитационные процессы в литосфере. М.: ИФЗ РАН, 2020. – 228 с.
15. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и таблицами. / Под редакцией М. Абрамовица, И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 832 с.
16. Стогний В.В., Заалишвили В.Б., Пономарева Н.Л. Современная геодинамика и сейсмичность Северного Кавказа: проблемы мониторинга. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 2. – С. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003.
17. Стогний П.В., Хохлов Н.И., Петров И.Б. Моделирование волновых процессов в геологических трещиноватых средах с использованием модели Шонберга. // Прикладная математика и механика. – 2020. – Т. 84. № 3. – С. 375–386. DOI: 10.31857/S0032823520030091.
18. Ткачев Г.В. Динамическая задача о вибрации трещины в упругом слое. / Рук. деп. в ВИНТИ 16 июля 1979 г. № 2595-79. Ростов-на-Дону: РГУ, – 1979.
19. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. Topological method of solving boundary-value problems and block elements. // Doklady Physics. – 2013. – Vol. 58. No. 4. – pp. 152–155. DOI: 10.1134/S1028335813040083.
20. Bostrom A. Review of hypersingular integral equation method for crack scattering and application to modeling of ultrasonic nondestructive evaluation. // Applied Mechanics Reviews. – 2003. – Vol. 56. – pp. 383–405.

21. Ceeseaman B.A., Santare M.H., Thermal residual stress and interphase effects on crack-inclusion interaction. // *Journal of Composite Materials*. – 2002. – Vol. 36. No. 5. – pp. 553–569.
22. England A.H. A crack between dissimilar media. // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. – 1965. – Vol. 32. – pp. 400–402.
23. Erdogan F. Stress distribution in a nonhomogeneous elastic plate with cracks. // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. – 1963. – Vol. 30. – pp. 232–237.
24. Komatitsch D., Tromp J. Introduction to the spectral element method for three-dimensional seismic wave propagation. // *Geophysical Journal International*. – 1999. – Vol. 139. No. 3. – pp. 806–822.
25. Pavlova A.V., Telyatnikov I.S. Method for studying mixed problems in modeling structurally inhomogeneous materials with coatings. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1353. Art. No. 012069. DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012069.
26. Shifrin E.I. Inverse spectral problem for a rod with multiple cracks. // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2015. – Vol. 56–57. – pp. 181–196. DOI: 10.1016/j.ymssp.2014.11.004.
27. Telyatnikov I.S., Pavlova A.V. Fictitious Absorption Method in a Dynamic Problem for a Layer Weakened by a Crack. // *Advanced Structured Materials*. – 2023. – Vol. 176. – pp. 211–230. DOI: 10.1007/978-3-031-17073-7_14.

References

1. Babeshko V.A. Generalized factorization method in spatial dynamic mixed problems of elasticity theory. Moscow. Nauka. 1984. 265 p. (In Russ.)
2. Babeshko V.A. Media with inhomogeneities (the case of a set of inclusions and cracks). *Mechanics of Solids*. 2000. Vol. 373. No. 3. pp. 5–9. (In Russ.)
3. Vatulyan A.O., Baranov I.V. On determining the crack configuration in an anisotropic elastic medium. *Akusticheskij zhurnal*. 2005. Vol. 51. No. 4. pp. 456–462. (In Russ.)
4. Vorovich I.I., Babeshko V.A. Dynamic mixed problems of elasticity theory for nonclassical regions. Moscow. Nauka. 1979. 320 p. (In Russ.)
5. Glushkov E.V., Glushkova N.V. Diffraction of elastic waves on spatial cracks of arbitrary shape in plan. *Applied Mathematics and Mechanics*. 1996. Vol. 60. No. 2. pp. 282–289. (In Russ.)
6. Glushkov E.V., Glushkova N.V., Golub M.V. Blocking and localization of energy in elastic layered waveguides with defects. *Akusticheskij zhurnal*. 2006. Vol. 52. No. 3. pp. 314–325. (In Russ.)
7. Zaaliishvili V.B., Golik V.I. Geophysical support of mining production. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 85–98. DOI: 10.46698/t6803-6487-0430-d. (In Russ.)
8. Environmental and Climate Change: in 8 volumes. Eds. N.P. Laverov et al. Moscow. IPE RAS. Vol. 1. Seismic Processes and Disasters. 2008. 404 p. (In Russ.)
9. Kardovsky I.V., Pryakhina O.D., Smirnova A.V. Solution of a dynamic problem for a three-layer medium with cracks. *Bulletin of universities. North-Caucasian region. Natural Sciences*. 2004. No. 3. pp. 38–43. (In Russ.)
10. Pryakhina O.D., Smirnova A.V. Integral equations of dynamic problems for multilayer media containing a system of cracks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2005. Vol. 69. Issue 2. pp. 345–351. (In Russ.)
11. Pryakhina O.D., Smirnova A.V. Construction of determinants of Green's matrix-symbols of three-layer media with defects of different nature. *Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation*. 2012. Vol. 9. No. 2. pp. 56–63. (In Russ.)
12. Pryakhina O.D., Smirnova A.V. Construction of determinants of Green's matrix-symbols of multilayer media with defects based on the theory of vibration-strength “viruses”. *Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation*. 2006. Vol. 3. No. 2. pp. 44–54. (In Russ.)

13. Sobisevich A.L. Selected problems of mathematical geophysics and volcanology. Moscow. IPE RAS. 2010. 464 p. (In Russ.)
14. Sobisevich L.E., Sobisevich A.L., Fatyanov A.G. Long-period seismogravity processes in the lithosphere. Moscow. IPE RAS. 2020. 228 p. (In Russ.)
15. Handbook of special functions with formulas, graphs, and tables. Eds. M. Abramovits, I. Stigan. Moscow. Nauka. 1979. 832 p. (In Russ.)
16. Stogny V.V., Zaaliishvili 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. No. 2. pp. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003. (In Russ.)
17. Stogny P.V., Khokhlov N.I., Petrov I.B. Modeling of wave processes in geological fractured media using the Schonberg model. *Applied Mathematics and Mechanics*. 2020. Vol. 84. No. 3. pp. 375–386. DOI: 10.31857/S0032823520030091. (In Russ.)
18. Tkachev G.V. Dynamic problem of vibration of a crack in an elastic layer. Head of Dep. at VINITI. July 16 1979. No. 2595-79. Rostov-on-Don. RSU. 1979. (In Russ.)
19. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. Topological method of solving boundary-value problems and block elements. *Doklady Physics*. 2013. Vol. 58. No. 4. pp. 152–155. DOI: 10.1134/S1028335813040083.
20. Bostrom A. Review of hypersingular integral equation method for crack scattering and application to modeling of ultrasonic nondestructive evaluation. *Applied Mechanics Reviews*. 2003. Vol. 56. pp. 383–405.
21. Ceeseman B.A., Santare M.H., Thermal residual stress and interphase effects on crack-inclusion interaction. *Journal of Composite Materials*. 2002. Vol. 36. No. 5. pp. 553–569.
22. England A.H. A crack between dissimilar media. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1965. Vol. 32. pp. 400–402.
23. Erdogan F. Stress distribution in a nonhomogeneous elastic plate with cracks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1963. Vol. 30. pp. 232–237.
24. Komatitsch D., Tromp J. Introduction to the spectral element method for three-dimensional seismic wave propagation. *Geophysical Journal International*. 1999. Vol. 139. No. 3. pp. 806–822.
25. Pavlova A.V., Telyatnikov I.S. Method for studying mixed problems in modeling structurally inhomogeneous materials with coatings. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1353. Art. No. 012069. DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012069.
26. Shifrin E.I. Inverse spectral problem for a rod with multiple cracks. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. Vol. 56–57. pp. 181–196. DOI: 10.1016/j.ymssp.2014.11.004.
27. Telyatnikov I.S., Pavlova A.V. Fictitious Absorption Method in a Dynamic Problem for a Layer Weakened by a Crack. *Advanced Structured Materials*. 2023. Vol. 176. pp. 211–230. DOI: 10.1007/978-3-031-17073-7_14.

DOI: 10.46698/VNC.2025.67.58.001

Original paper

Social vulnerability and spatial adaptation: A case study of community responses to natural disasters in Silchar, Assam State, India

A. Nath¹, V.B. Zaalishvili², G.P. Ganapathy³

¹ Department of Social Work, Assam University, Silchar 788011, Assam, India,
e-mail: Aditinath1@gmail.com;

² Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation,
e-mail: vzaal@mail.ru;

³ Centre for Disaster Mitigation and Management, Vellore Institute of Technology (VIT),
Vellore 632 014, Tamil Nadu, India, e-mail: seismogans@yahoo.com

Received: 04.04.2025, revised: 03.06.2025, accepted: 05.06.2025

Abstract: Relevance. The present study aims to assess the awareness and preparedness of the community of Silchar, Assam, for disasters using household survey. **Aim.** Assessing local community adaptation to natural disasters is essential for building resilient communities and reducing the impacts of disasters. Community-Based Disaster Risk Reduction (CBDRR) is essential for empowering vulnerable communities, such as those in Assam, India, to effectively address natural disasters. Given Assam's susceptibility to floods, earthquakes, and landslides, it is imperative to implement CBDRR programs that foster a culture of preparedness. Through collaborative learning of disaster prevention, mitigation, and response strategies, communities can better handle emergencies, leading to long-term resilience and improved disaster response for future generations. **Methods.** This helps in creating effective plans to get ready for them. Surveys show where people need more information and who might be more at risk. An initial survey was conducted in high-risk areas of Assam, India, identified using a multi-hazard map. The 50-question survey was designed to evaluate disaster awareness and preparedness of the Silchar City. It included multiple-choice questions on general knowledge, emergency response, supplies, communication plans, and preventative measures. **Results.** This study shows that it is important to make people more aware of disasters and better prepared. It found some things people do not know and suggests focusing on those areas to help the community handle disasters better. The findings highlight the importance of public awareness campaigns, early warning systems, and education programs to address these challenges in Cachar District of Assam State. The results of this study will help us see where people need to be better prepared for disasters. This information will be useful to identify areas to conduct relevant tailor-made training programs so people can get ready and handle disasters better.

Keywords: CBDRR, Silchar, household survey, vulnerability assessment, disaster preparedness.

Acknowledgments: The authors wish to extend their heartfelt thanks to the Vellore Institute of Technology (VIT) in Vellore, Tamil Nadu, India, Assam University, Silchar, Assam, India, and Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Nath A., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P. Social vulnerability and spatial adaptation: A case study of community responses to natural disasters in Silchar, Assam State, India. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 128-141. DOI: 10.46698/VNC.2025.67.58.001

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2025.67.58.001

Оригинальная статья

Социальная уязвимость и пространственная адаптация: пример исследования готовности местных сообществ реагировать на стихийные бедствия в городе Силчар, штат Ассам, Индия

А. Натх¹, В.Б. Заалишвили², Г.П. Ганапати³

¹ Кафедра социальной работы, Ассамский университет, Силчар 788011, Ассам, Индия, e-mail: Aditinath1@gmail.com;

² Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: vzaal@mail.ru;

³ Центр по смягчению последствий и управлению стихийными бедствиями, Технологический институт Веллора (VIT), Индия, 632 014, Веллор, Тамил Наду, e-mail: seismogans@yahoo.com

Статья поступила: 04.04.2025, доработана: 03.06.2025, принята к публикации: 05.06.2025

Резюме: Актуальность работы. Настоящее исследование направлено на оценку осведомленности и готовности сообщества Силчара, Ассам, к стихийным бедствиям с использованием опроса домохозяйств. **Цель исследований.** Оценка адаптации местного населения к стихийным бедствиям имеет важное значение для снижения последствий стихийных бедствий. Снижение риска стихийных бедствий на уровне уязвимых сообществ (Community-Based Disaster Risk Reduction, CBDRR) важно для расширения их прав и возможностей, когда необходимо эффективное реагирование на стихийные бедствия подобных Ассаму (Индия). Учитывая подверженность штата Ассам наводнениям, землетрясениям и оползням, крайне важно внедрять программы CBDRR, которые способствуют формированию у населения культуры готовности к стихийным бедствиям. Благодаря совместному обучению стратегиям предотвращения, смягчения и адекватного реагирования на стихийные бедствия, население может лучше справляться с чрезвычайными ситуациями, что приводит к долгосрочной устойчивости и улучшению реагирования на стихийные бедствия в будущем. Это помогает в создании эффективных планов по подготовке к бедствиям. **Методы работы.** Метод опроса населения показывает реальный уровень знаний и наиболее уязвимые категории. Первоначальный опрос был проведен в районах высокого риска Ассама, Индия, определенных с помощью карты множественных опасностей. Анкета из 50 вопросов была разработана для оценки осведомленности населения о стихийных бедствиях и оценки готовности города Силчар к чрезвычайным ситуациям. Она включала вопросы с несколькими вариантами ответов по общим знаниям, реагированию на чрезвычайные ситуации, материальному обеспечению, планам связи и профилактическим мерам. **Результаты работы** показывают, что важно повышать осведомленность людей о стихийных бедствиях и повышать уровень их готовности. Выявлены пробелы в осведомленности населения. Предлагается сосредоточиться на этих вопросах, чтобы помочь сообществам лучше справляться со стихийными бедствиями. Отмечена важность кампаний по повышению осведомленности общественности, систем раннего оповещения и образовательных программ для решения этих проблем в округе Качар штата Ассам. Наконец, результаты этого исследования показывают районы, где следует заметно улучшить подготовку к чрезвычайным ситуациям. Полученная информация необходима для определения областей, где необходимо внедрение соответствующих индивидуальных программ обучения для снижения уязвимости к стихийным бедствиям.

Ключевые слова: CBDRR, Силчар, обследование домохозяйств, оценка уязвимости, стихийное бедствие.

Благодарности: Авторы выражают искреннюю благодарность Технологическому институту Веллоре (VIT) в Веллоре, Тамил Наду, Индия, Университету Ассама, Силчар, Ассам, Индия, и Геофизическому институту Владикавказского научного центра Российской академии наук.

Для цитирования: Натх А., Заалишвили В.Б., Ганапати Г.П. Социальная уязвимость и пространственная адаптация: пример исследования готовности местных сообществ реагировать на стихийные бедствия в городе Силчар, штат Ассам, Индия. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 128-141. DOI: 10.46698/VNC.2025.67.58.001

Introduction

Assessing local community adaptation to natural disasters is crucial for identifying effective strategies to mitigate risks and promote sustainable development. [Svalova, 2022; Badov et al., 2022]. By conducting comprehensive assessments of local community adaptation to natural disasters, policymakers and practitioners can develop targeted interventions to enhance resilience and reduce the impacts of future events. Community Based Disaster Risk Reduction (CBDRR) activities engage vulnerable communities in learning disaster preparedness and risk reduction methods. This collaborative approach equips them to systematically prevent, prepare for, and respond to potential disasters. A strong local response fosters a culture of preparedness within the community. This translates to better long-term disaster resilience, as future generations are equipped to manage emergencies more effectively. India, with its vast size and varied geography, is one of the most disaster-prone countries globally, facing threats like floods, earthquakes, and cyclones. Assam, a state in the north-eastern part of India, is highly susceptible to multiple hazards and has a long history of natural disasters. Due to its specific geography and climate, Assam, as well as the entire Northeast region of India, constantly face threats from natural disasters such as floods, earthquakes, and landslides (fig. 1). Assam is heavily affected by flooding in India, as about 40% of its land is at risk of being submerged by large rivers like the Brahmaputra. Assam is home to the Brahmaputra, a powerful river with a massive catchment area in the Himalayas. This, combined with Assam's location in India's northeast where the monsoon rains are heaviest, leads to a huge volume of water flowing through the state. Additionally, Assam's flat plains with minimal elevation make it difficult for excess water to drain effectively, leading to widespread flooding. Northeast India is situated in a high-risk earthquake zone (Zone V) within the Indian sub-continent. Due to its geological conditions, the region is prone to seismic activity, often accompanied by secondary hazards such as landslides, flooding, and a series of smaller earthquakes. Exogenous processes are especially activated due to a climate change and have a complex manner of appearance due to their cross-influence [Burdzieva et al., 2023, 2024; Gabaraev et al., 2023; Yaitskaya et al., 2023; Zaalishvili et al., 2024]. And seismic factor governs not only seismic impact on constructions but mainly activate exogenous processes [Karavaev et al., 2022; Chernov et al., 2022].

Most of Assam is situated within the Brahmaputra River Valley, except for its southern districts. The valley's northern and eastern borders are defined by the Himalayan Frontal Thrust (HFF). In the eastern region, the HFF is accompanied by the arc of the Lohit and Naga Thrusts. This region has experienced significant seismic activity, including major earthquakes in 1897 and 1950. The 1897 earthquake is particularly notable for its dramatic accounts of ground displacement during the event. Earthquake with a magnitude 7.5 struck in Cachar district in the year 1896 is the highest in the study area. The increasing demand for agricultural land and rampant deforestation have contributed to the destabilization of hillsides in the region. During the monsoon season, this often leads

to devastating landslides. Guwahati city, for example, has experienced several such incidents in its hilly areas due to inadequate urban planning. The relentless demand for land has driven communities to build homes in environmentally vulnerable zones, increasing their risk of landslides (<https://www.asdma.gov.in/hazardous.html>).

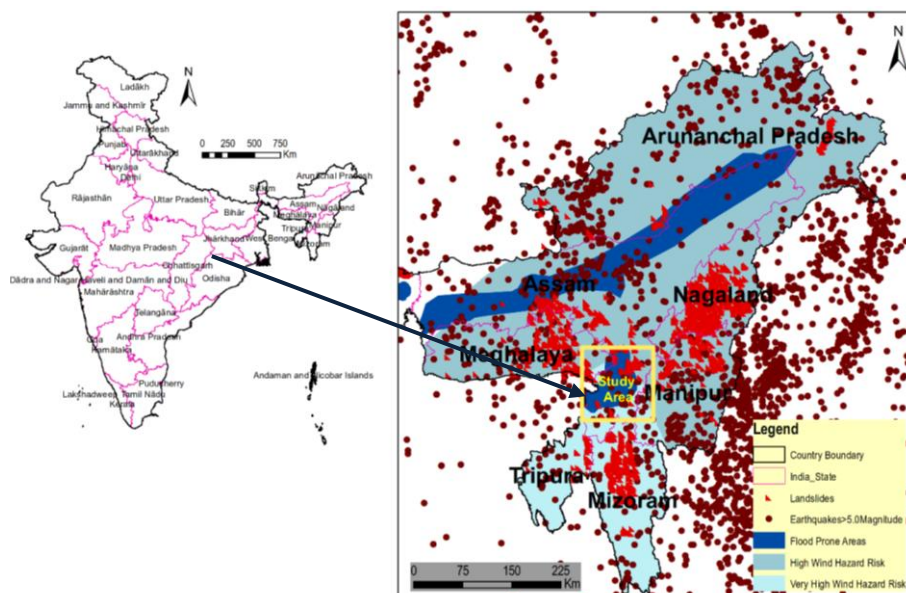


Fig. 1. Location and multi-hazard map of the study area

Household surveys are vital for understanding public disaster awareness. They allow researchers to reach a representative sample of the population and gather specific information about their knowledge of hazards, preparedness measures, and response procedures. It helps identify areas where knowledge is lacking, measure preparedness levels, and pinpoint vulnerable populations. The awareness knowledge is crucial for developing effective disaster preparedness programs, improving communication during emergencies, and building more resilient communities.

Several studies emphasize the importance of community-level preparedness. [Shannon, 2015], in a study of a midwestern US county, found that a significant portion of residents reported limited personal preparedness and lacked familiarity with local emergency systems. This underscores the need to focus beyond emergency services and involve local citizens in readiness programs. Similarly, [Permana et al., 2022] is integrative review highlights that disaster preparedness education enhances community preparedness, with various strategies and content (psychological first aid, evacuation routes, emergency items) contributing positively. However, they also note the need for more rigorous methods and consideration of local needs in designing such programs.

Household-level preparedness is examined by [Corpuz et al., 2023] in Angeles City, Philippines. Their descriptive survey revealed a varied landscape of preparedness, with awareness of natural disasters present but a need for enhanced education and information sharing. A key finding was the importance of community engagement in disaster response and recovery. [Mahdaviazad, Abdolahifar, 2014] assessed household preparedness in Shiraz, Iran, finding encouraging levels of knowledge but areas for improvement in attitudes and practices, particularly through motivational education and inter-organizational cooperation. [DeBastiani et al., 2015], using data from the BRFSS (2006-2010) in the US, found that only a minority felt well-prepared and possessed recommended preparedness

items. Their analysis identified younger age, being female, lower education, and Spanish language preference as risk factors for lower preparedness, suggesting the need for targeted interventions for vulnerable populations.

The role of social capital and community resources in disaster preparedness is explored by [Nguyễn et al., 2023] in Seattle. Their study indicated that considering shared resources increased reported preparedness in racial-majority-dominated zip codes, suggesting that traditional individualistic measures might underestimate preparedness. They also found that greater bridging social capital and longer neighborhood tenure were associated with higher preparedness, advocating for “mainstreaming” disaster preparedness by focusing on daily resources, social capital, and collective community assets.

Challenges in researching disasters are addressed by [Spence, Lachlan, 2025], who discuss methodological and data-analysis difficulties due to the unexpected and nonroutine nature of crises. They highlight the limitations imposed by disaster conditions on data collection, randomization, and generalizability, which is crucial to consider when conducting research in the aftermath of an event like the one in Silchar.

Risk communication is identified as a vital strategy for enhancing disaster preparedness. [Rahman, Munadi, 2019] propose a disaster risk communication approach based on Lasswell’s model, emphasizing the interactive exchange of information to reduce uncertainty and promote appropriate actions. They cite the “Smong story” as a successful example of conveying a tsunami risk message. [Rod et al., 2011] explored responses to risk communication in a Norwegian community facing an impending rockslide-induced tsunami, finding that parents perceived the information as most useful, while those with prior disaster experience and non-parents posed communication challenges. [Mileti, O’Brien, 1992] is study on aftershock warnings after the Loma Prieta earthquake revealed a “normalization bias” among non-victims, which constrained risk perception and protective response, highlighting the complexities of warning communication in different contexts.

The concept of community resilience, closely linked to social vulnerability and spatial adaptation, is explored in several papers. [Zhai, Lee, 2024] examined community disaster resilience in different types of communities in Zhengzhou, China, finding variations in human capital, physical infrastructure, social capital, institutional capital, community competence, and adaptation. Their work suggests that resilience-building strategies should be tailored to specific community types. [Whittaker et al., 2020] developed a conceptual model for enhancing community disaster resilience through preparedness, drawing from past events and emphasizing social media, community empowerment, and shared responsibility. [Bergstrand et al., 2015] empirically connected social vulnerability and community resilience across US counties, finding that more vulnerable counties tend to be less resilient, with regional differences observed. This reinforces the importance of understanding both vulnerability and resilience in disaster contexts. [Zaman, Raihan, 2023] conducted a systematic review of community resilience literature, outlining current research trends in methods, dimensions, and theoretical standpoints, advocating for a comprehensive multi-phase research model for effective policymaking. [Topping et al., 2010] is special issue on building local capacity for long-term disaster resilience defines resilience as the capacity to survive, retain essential functions, and adapt post-disaster. They introduce the concept of “smart” resilience, which coordinates both “soft” (preparedness, response) and “hard” (mitigation) strategies. [Green et al., 2006], drawing from a livelihoods framework after Hurricane Katrina, focused on the vulnerability-resilience continuum, emphasizing the need to understand community needs and social rela-

tionships to improve resilience during recovery. [King, 2000] argues for the necessity of awareness and education for predictable natural disasters, as individuals and communities are often isolated during hazard events, and highlights inadequate preparedness levels.

The current research on disaster preparedness in Assam lacks in-depth, recent data specifically for Silchar. While household surveys are recognized as valuable tools, existing studies may focus on broader regions or not utilize surveys. This research gap limits our understanding of Silchar's unique preparedness landscape. By conducting a household survey in Silchar, this research can address this gap by providing a comprehensive picture of the community's current preparedness levels and informing targeted local response strategies tailored to Silchar's specific needs.

Materials and Methods

The multi-hazard map of Assam State was used to identify high-risk areas that were then selected for this study. Questionnaire to test the disaster awareness and preparedness level of people in the multi hazard areas was planned by using multiple choice questions. The focus of the questions is relevance to the Study Area and its hazard proneness. This questionnaire is designed to test a household's knowledge and readiness for emergencies. It covers various aspects like recognizing common disasters in their area, proper responses during events like earthquakes or gas leaks, and knowledge of essential supplies to have on hand. It even investigates into communication plans and preventative measures to make their home safer. By answering these questions, one can identify areas where their household might need improvement and take steps to be better prepared for whatever comes in future.

This survey asks questions to see how ready a household is for emergencies. It checks what they know in a few important areas. Questions about "General Preparedness Knowledge" ask about common dangers and how to prevent them. "Emergency Response Knowledge" questions look at how well they can react safely during different disasters. "Emergency Supply Knowledge" questions check if they know what important things to have in an emergency kit and for first aid. Questions on "Communication and Planning" assess their planning for specific disasters and establishing a family communication plan. By covering these areas, the present survey provides a comprehensive picture of a household's knowledge and preparedness for emergencies.

To achieve reliable results from surveys, a well-designed questionnaire and a representative sample were required. The goals of the surveys were first defined, and clear, concise questions employing a mix of formats were chosen to maintain respondent engagement. Piloting of the questionnaires was conducted with a small group prior to widespread distribution. Subsequently, the target audience for the surveys was identified, and a sampling method that reached them was selected. Random sampling was considered ideal, although convenience sampling or stratified sampling could also be employed depending on the available resources. Finally, a large enough sample size was targeted to ensure statistically significant results. By adhering to these steps, questionnaires were crafted that provided researchers with the data they necessitated.

Totally fifty questions were prepared twenty-five on Disaster Awareness and twenty-five questions on Disaster Preparedness. About one hundred households were selected minimum one sample from each household. Questionnaire check list made in excel and the data collection were done by door to door by visiting the place in person. The overall methodology of the study is presented in the Fig. 2.

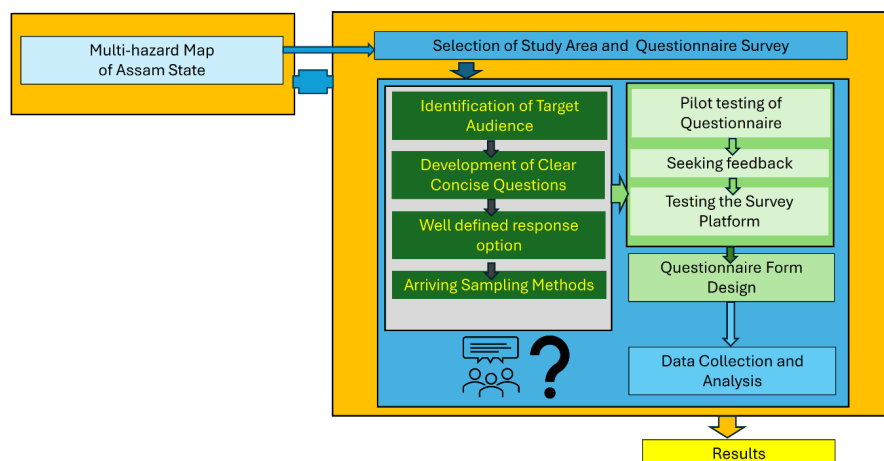


Fig. 2. Overall methodology of the study

Results and Discussion

Resilience to Disaster

A fifty-question survey was given to 100 households in a disaster-prone area of Assam, India, and 83 responded fully. Half the questions checked Disaster Awareness (knowledge of local disasters and how to respond), and the other half checked Disaster Preparedness (personal and family emergency plans). These questions aim to see how well people understand and prepare for disasters, covering topics like safety, planning, first aid, and community resilience (fig. 3). The study used the 83 complete responses.

Common Disasters and Safety Measures 	Preparedness and Response 
Natural Disasters - Earthquakes (Safety during earthquakes), Floods (Preventing disease after floods, Signs of an impending flood), Cyclones (Shelter during cyclones, Shelter during cyclones), Wildfires (Preventing the spread of wildfires), Landslides (Protecting yourself from a landslide), Lightning (Protecting yourself from lightning), Heatstroke (Recognizing and responding to heatstroke) Other Emergencies - Fire (Responding to smoke or fire, Preventing electrical fires), Gas Leaks (Responding to a gas leak), Snakes (Dealing with snakes in the house), Power Outages (Safe generator usage) Emergency Preparedness - Emergency kit essentials - Emergency communication plan	Family Disaster Plan - Review frequency; Emergency kit availability; Essential items in kit; Safe meeting point; Emergency alerts and warnings; Evacuation routes and shelters; Home resilience; Communication plan; Designated caregiver; Training and drills Home Safety - Document and valuables security; Backup power source; Community discussion; Home security; Water supply; Utility shutoff; Home hazard hunt Emergency Skills - Fire escape drills; Emergency services awareness; Livestock and pet evacuation; First aid and CPR training; Emergency food storage; Transportation arrangements; Basic medical procedures; Involving children

Fig. 3. Questionnaire group for level of disaster awareness and disaster preparedness

Level of Disaster Awareness

The questions are in two parts: Disaster Awareness (understanding local natural disasters and their risks like floods, wildfires, landslides, and tsunamis) and Disaster Preparedness (practical emergency actions and preparations). These questions help people understand local dangers, learn safety steps, create emergency plans, improve first aid, and build community strength. By understanding risks and being prepared, people can better protect themselves during disasters. Answering these questions helps individuals see how well they understand disaster risks, safety, and preparedness.

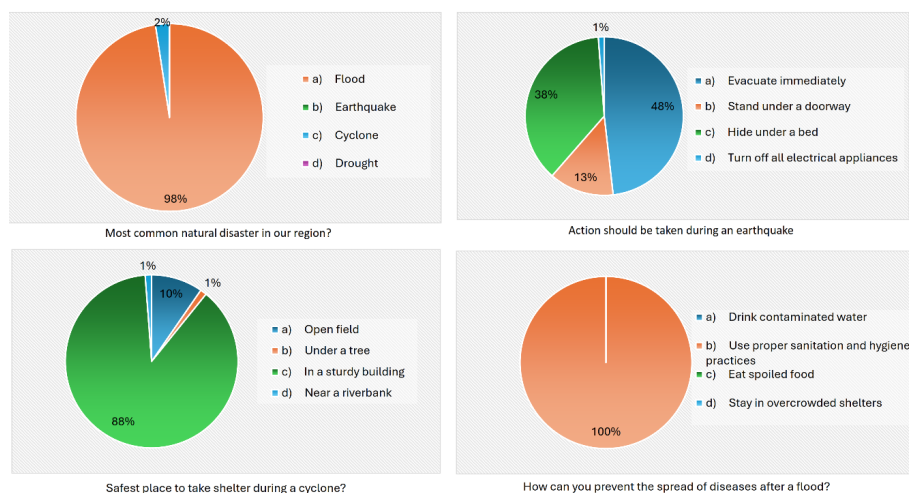


Fig. 4. Disaster Preparedness and Response in Silchar Region

The questions about the most common natural disaster in the region, actions to take during an earthquake, a safe shelter during a cyclone, and preventing disease after a flood were asked (fig. 4). Based on the responses, floods are the most common natural disaster in the region, accounting for 81% of the responses. When faced with an earthquake, people are most likely to evacuate immediately (40%). During a cyclone, staying in a sturdy building is recommended (73%). To prevent disease after a flood, proper sanitation is crucial (83%). Surprisingly, clear skies were perceived as a sign of an impending flood, despite being incorrect. In case of a house fire, calling the fire department is the most common response (44%).

The survey results indicate that floods are the most common natural disaster in the region, followed by earthquakes and cyclones. The most common responses to these disasters include evacuation, staying in sturdy buildings, and proper sanitation. However, there is a misconception that clear skies indicate an impending flood. To improve resilience, the region should prioritize flood mitigation, promote earthquake safety measures, enhance cyclone preparedness, and address sanitation concerns. Additionally, public awareness campaigns and early warning systems are crucial.

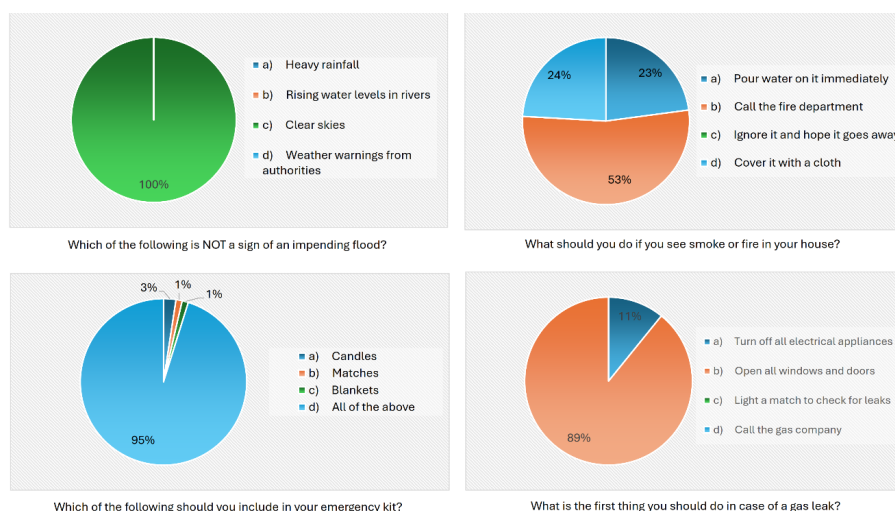


Fig. 5. Questions related to promote awareness and preparedness for various emergency situations in Silchar Region

The other questions were covered a wide range of potential hazards, including natural disasters, animal encounters, and household emergencies. The questions aim to assess understanding of how to protect oneself during thunderstorms, respond to snake encounters, maintain smoke alarms, stay cool during heatwaves, assist trapped individuals after earthquakes, handle flash floods while driving, prevent wildfires, prioritize essential first aid items, and respond to gas leaks. These questions aim to promote public awareness and preparedness for various emergency situations that households may encounter. By assessing knowledge in these areas, it can help identify areas where further education and awareness initiatives are needed to ensure community safety and resilience.

Questions were asked to cover topics such as flood signs, fire safety, emergency kit contents, and gas leak response. The questions aim to promote awareness and preparedness for various emergency situations (fig. 5). Only one in four people correctly knew that clear skies do not mean a flood is coming. Similarly, 25% correctly chose to call the fire department in case of a house fire, while 25% recognized the importance of including all items in an emergency kit. Lastly, only 25% correctly identified turning off electrical appliances as the first step in case of a gas leak. These results highlight a significant lack of knowledge and preparedness among respondents regarding emergency procedures. The survey results show that respondents lack knowledge about emergency preparedness. People had trouble knowing the signs of floods, how to stay safe from fire, what to put in an emergency kit, and what to do if there's a gas leak. The analysis of the emergency preparedness quiz reveals a significant lack of knowledge among respondents. With an average of 25% correct answers, it is clear that many individuals are not familiar with essential safety procedures.

Nine Questions were asked related to safety and survival. For lightning strikes, staying indoors away from windows is the safest option, with 72% of respondents choosing this answer. When encountering snakes, calling animal control is recommended, with 45% of respondents selecting this choice. For smoke alarms, replacing batteries every six months is considered best practice, with 42% of respondents agreeing. During heatwaves, staying hydrated and using fans or air conditioning is crucial, as chosen by 60% of respondents. In the case of earthquakes, calling for help and providing support until assistance arrives is the most appropriate response, with 60% of respondents selecting this option. For flash floods, abandoning your vehicle and seeking higher ground is the recommended response, with 48% of respondents choosing this option. When preventing wildfires, disposing of cigarette butts properly and clearing vegetation around your home are important steps, with 52% and 29% of respondents choosing these options, respectively. In a first aid kit, bandages are considered the most important item, with 74% of respondents selecting this choice. For gas leaks, evacuating immediately and calling the gas company is the safest response, with 78% of respondents agreeing.

The survey results show that respondents understand safety and survival practices, but there are areas for improvement, such as snake encounters and wildfire prevention. While most respondents know the safest actions for lightning strikes, heatwaves, earthquakes, and gas leaks, more education is needed on topics like snake encounters and wildfire prevention.

The survey results show that floods are the most common natural disaster in Silchar, Assam. While respondents understand safety measures for common emergencies, there are knowledge gaps in areas like flood signs, fire safety, emergency kit contents, and gas leaks. To improve resilience, the region should focus on flood mitigation, earthquake

safety, cyclone preparedness, sanitation, public awareness campaigns, and early warning systems. Additionally, addressing misconceptions about flood signs and promoting emergency preparedness education are crucial.

Level of Disaster Readiness

25 Questions were asked in this section; to assess their preparedness level and identify areas for improvement and these were grouped into two sections: Emergency Preparedness Planning and Emergency Response Skills. The first section is focused on planning and preparing for emergencies, including creating a family preparedness plan, identifying safe meeting points, knowing evacuation routes, and maintaining emergency kits. The second section highlights practical skills and knowledge required for effective emergency response. Questions in this section cover topics such as fire safety drills, knowing local emergency services, pet preparedness, first aid and CPR training, food storage, evacuation transportation, and emergency medical procedures. The questions provided are important in connection with disasters because they help individuals assess their preparedness level, identify gaps in their emergency kits, develop effective communication plans, prepare their homes for disasters, be aware of local resources, and involve their entire family. The questions cover a range of topics, including emergency planning, home safety, communication, community preparedness, first aid, and pet preparedness. By answering these questions, one can assess their preparedness level and pinpoint areas where they may need to enhance their plans and knowledge.

Seven questions were asked to ensure the households have necessary supplies and resources to survive a disaster (fig. 6).

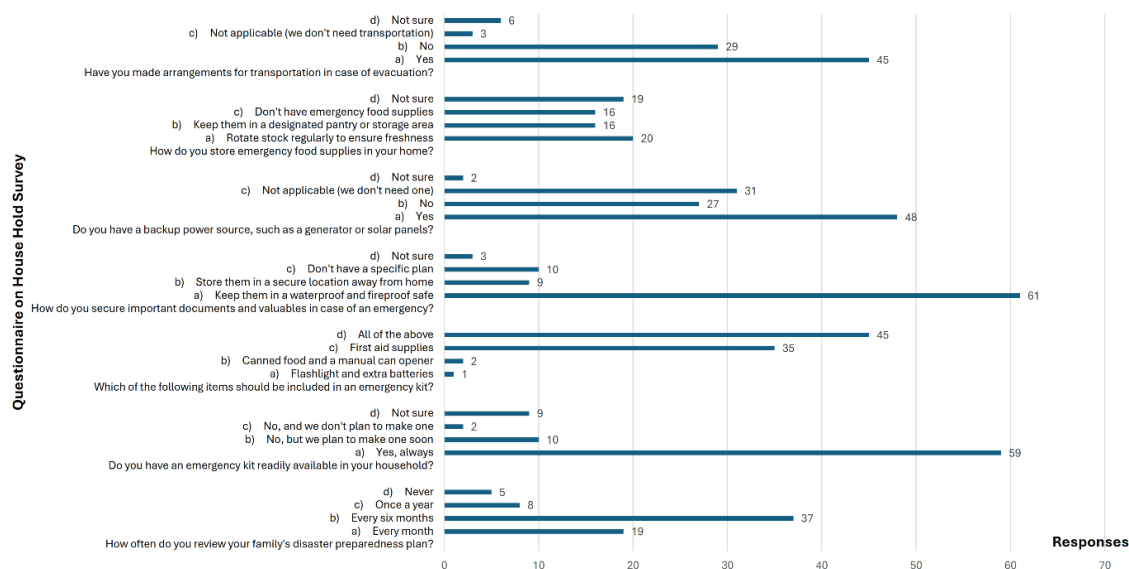


Fig. 6. Responses to questions related on ensuring the households have necessary supplies and resources to survive a disaster

Most respondents (59%) have an emergency kit readily available, demonstrating a positive step towards disaster preparedness. However, 10% plan to make one in the future, indicating a need for further awareness and encouragement. A considerable number (61%) have a plan for securing important documents, suggesting a good understanding of the importance of safeguarding personal information during emergencies. While 48% have a backup power source, 27% do not, highlighting a potential vulnerability in case

of power outages. Half (46%) have not considered emergency food supplies, indicating a need for more education on the importance of having a stockpile of non-perishable food items. A positive trend is seen with 45% having decided for transportation during evacuations, demonstrating foresight in planning for potential displacement. The survey data suggests a general awareness of disaster preparedness among respondents, with many taking proactive steps to ensure their safety and well-being. However, there are still areas where education and encouragement are needed to improve preparedness levels.

Eleven questions were asked regarding developing a plan for how to respond to a disaster, including communication strategies and evacuation procedures. Most respondents (64%) have a designated safe meeting point for their family in case of evacuation, indicating a good understanding of emergency preparedness. Mobile phone alerts are the most popular method for receiving emergency warnings (34%), followed by local authorities (29%). This suggests a reliance on technology for timely information. Considerable number (58%) are familiar with evacuation routes and shelters in their area, demonstrating preparedness for potential disasters. Mobile phone calls or text messages are the primary method for communication during emergencies (78%), highlighting the importance of reliable mobile technology. While 17% have a designated caregiver, a significant majority (59%) do not, indicating a need for further planning in households with children, elderly, or pets. A significant percentage (68%) have discussed disaster preparedness with their neighbours or community members, demonstrating a community-oriented approach to emergency planning. Half (49%) have a plan for securing their home and belongings, suggesting a proactive approach to protecting property during emergencies. The survey data indicates a general awareness of disaster preparedness among respondents, with many taking proactive steps to ensure their safety and well-being. However, there are still areas where further education and encouragement are needed, particularly regarding designated caregivers and the importance of having a plan for securing home and belongings.

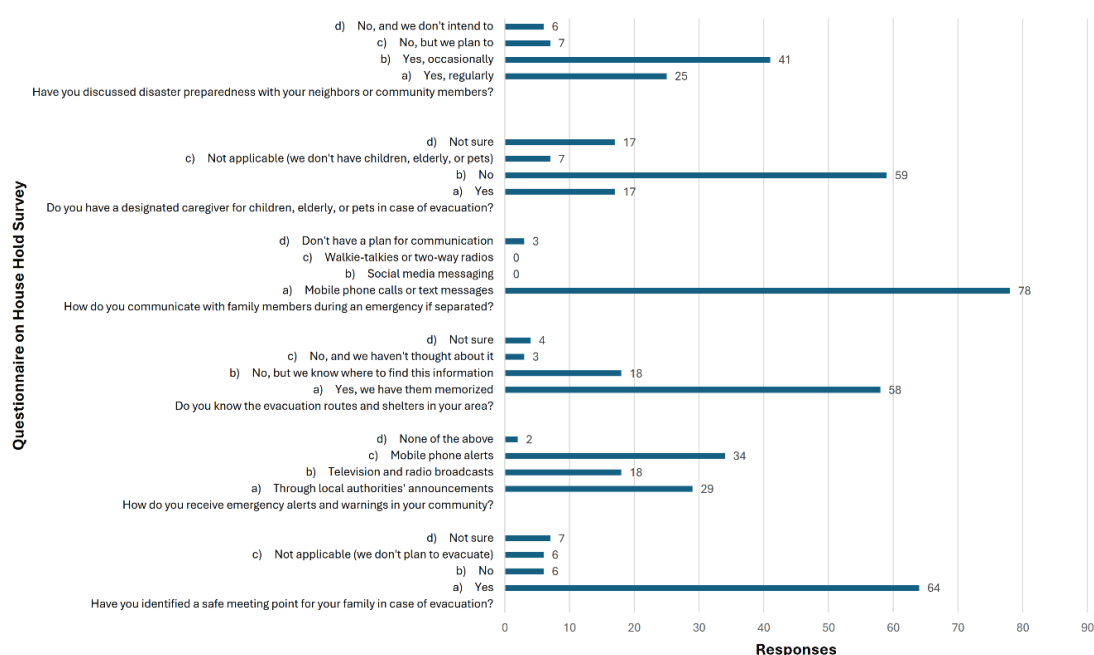


Fig. 7. Responses to questions related to developing a plan for how to respond to a disaster, including communication strategies and evacuation procedures

Further questions were asked regarding making their home safer and more resilient to disasters, as well as learning basic survival skills. Most respondents (60%) have taken steps to make their homes more resilient to disasters, indicating a positive trend in proactive preparedness. A considerable number (64%) have a plan for ensuring an adequate water supply during emergencies, demonstrating a good understanding of essential needs. While 40% have conducted a home hazard hunt, 28% have not, highlighting a need for increased awareness and education about identifying potential risks. A significant portion (77%) practice fire escape drills at least once a year, demonstrating a positive approach to fire safety (fig. 7). While 21% have received training, 28% plan to, indicating a growing interest in acquiring these essential skills. A majority (61%) know how to perform basic emergency medical procedures, demonstrating a satisfactory level of preparedness for handling medical emergencies. The survey data suggests a general awareness of disaster preparedness among respondents, with many taking proactive steps to ensure their safety and well-being. However, there are still areas where further education and encouragement are needed, particularly regarding home hazard hunts and first aid training.

The Disaster readiness survey results show that while many respondents have taken steps towards disaster preparedness, there are still areas for improvement. Most have emergency kits and plans for securing documents, but fewer have backup power sources or emergency food supplies. Regarding emergency planning, many have safe meeting points and communication plans, but fewer have designated caregivers or plans for securing their homes. For home safety and resilience, a majority have made their homes more resilient and have fire escape drills, but fewer have conducted home hazard hunts or received first aid training. Overall, the survey highlights the need for continued education and awareness campaigns to improve preparedness levels in Silchar city.

Conclusions

To evaluate a community's ability to adapt to natural disasters, it is important to consider several key factors. Institutional capacity refers to the effectiveness of local government, emergency services, and community groups in managing disasters. Social capital measures the community's trust, cooperation, and social connections, which can help in adaptation. Economic capacity assesses the community's financial resources, access to credit, and ability to diversify livelihoods, all of which play a crucial role in resilience. The present study provides valuable insights into disaster awareness and preparedness in Silchar city, Cachar District of Assam State in India. By assessing the knowledge of residents, the study relates areas for improvement and informs the development of targeted interventions. This study used a household survey approach and a questionnaire to assess local resilience during disasters. It focused on household disaster preparedness, assessing not just people's understanding of emergency procedures but also how well-prepared households were in terms of planning and acting. The study highlights the importance of educational initiatives and family preparedness planning in enhancing community resilience. By equipping residents with knowledge and skills through education and promoting the use of emergency preparedness kits, communities can better respond to and recover from disasters.

According to the household survey, the results indicate diverse levels of disaster awareness and preparedness among households in Silchar City, Assam. While many respondents demonstrated knowledge of common natural disasters and basic safety measures, significant gaps were identified in areas such as emergency preparedness

planning, home safety, and first aid skills. The most common natural disaster in the region is floods, followed by earthquakes and cyclones. Despite this, there is a lack of awareness about flood signs and proper emergency procedures.

To enhance disaster resilience, the region must prioritize public awareness campaigns, early warning systems, and targeted education programs. Addressing misconceptions about flood signs, promoting emergency preparedness education, and improving access to essential supplies are crucial steps. To ensure comprehensive readiness for all residents, disaster preparedness initiatives must be continuously evaluated and improved, with a focus on addressing factors like socioeconomic status and self-efficacy. The study provides valuable insights that can help households in Silchar City, Assam, become better prepared for disasters and enhance their overall resilience. By understanding the risks, taking proactive steps, and working together as a community, households can significantly improve their safety and well-being. The findings also can contribute to building a more resilient community and can inform policy decisions. By addressing these challenges, Silchar can better protect its residents from the devastating impacts of natural disasters.

References

1. Badov A.D., Badov O.A., Dzakhova L.Kh., Byazrova J.B. Typology of mountain settlements in North Ossetia and the main directions of their sustainable development. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 119–128. DOI: 10.46698/VNC.2022.95.96.009. (In Russ.)
2. Burdzieva O.G., Kozyrev E.N., Kortiev A.L., Revazov M.O. Features of formation of geocological risks in the mountainous territory based on the analysis of cause-and-effect relations of geodynamic endogenous and exogenous processes. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 124–134. DOI: 10.46698/VNC.2023.88.99.010. (In Russ.)
3. Burdzieva O.G., Revazov M.O., Kortiev A.L., Gogichev R.R. Influence of geodynamic processes on the geocological load of mountain region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014. (In Russ.)
4. Chernov Yu.K., Zaalishvili V.B., Chernov A.Y. Some new data on the influence of various soil conditions on probabilistic seismic hazard assessment of territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 85–100. DOI: 10.46698/VNC.2022.32.20.007. (In Russ.)
5. Gabaraev A.F., Melkov D.A., Kortiev A.L., Kozyrev E.N. Influence of geomorphological conditions of a mountain region on the intensity of hazardous geological processes. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 198–212. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.50.016. (In Russ.)
6. 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. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2022.19.24.001. (In Russ.)
7. Svalova V.B. Geocological risk management and problems of sustainable development of mountain territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 129–147. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010. (In Russ.)
8. Yaitskaya N.A., Dzaganiiia L.M., Brigida V.S. Geocological hazards in context of climate change of territories of Caucasus subtropical zone. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 118–132. DOI: 10.46698/VNC.2023.54.85.010. (In Russ.)
9. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Shmanatov G.V. Geocological aspects of earthquake intensity formation based on instrumental data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 45–60. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004. (In Russ.)

10. Bergstrand K., Mayer B., Brumback B., Zhang Y. Assessing the relationship between social vulnerability and community resilience to hazards. *Social Indicators Research*. 2015. Vol. 122. Issue 2. pp. 391–409. DOI: 10.1007/s11205-014-0698-3.
11. Corpuz R.R.N., Nacu J.A., Manalo J.M., Laxamana J.T. Enhancing disaster preparedness in Angeles City: Insights, gaps, and community resilience. *EPRA International Journal of Multidisciplinary Research*. 2023. Vol. 9. Issue 10. pp. 1–10. DOI: 10.36713/EPRA14785.
12. DeBastiani S.D., Strine T.W., Vagi S.J., Barnett D.J., Kahn E.B. Preparedness perceptions, sociodemographic characteristics, and level of household preparedness for public health emergencies: Behavioral Risk Factor Surveillance System, 2006–2010. *Health Security*. 2015. Vol. 13. Issue 5. pp. 317–326. DOI: 10.1089/hs.2014.0093.
13. Green J., Gill D., Kleiner A. From vulnerability to resiliency: Assessing impacts and responses to disaster. *Journal of Rural Social Sciences*. 2006. Vol. 21. Issue 2. Art. No. 6.
14. King D. You're on your own: Community vulnerability and the need for awareness and education for predictable natural disasters. *Journal of Contingencies and Crisis Management*. 2000. Vol. 8. Issue 4. pp. 223–228. DOI: 10.1111/1468-5973.00143.
15. Mahdaviazad H., Abdolahifar G. Assessing household natural disaster preparedness in Shiraz, Iran, 2011: Results of a knowledge, attitude, and practices survey. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*. 2014. Vol. 8. Issue 4. pp. 349–352. DOI: 10.1017/dmp.2014.61.
16. Mileti D.S., O'Brien P.W. Warnings during disaster: Normalizing communicated risk. *Social Problems*. 1992. Vol. 39. Issue 1. pp. 40–57. DOI: 10.2307/3096912.
17. Nguyễn L.T., Bostrom A., Abramson D.B., Moy P. Understanding the role of individual- and community-based resources in disaster preparedness. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2023. Vol. 96. Art. No. 103882. DOI: 10.1016/j.ijdr.2023.103882.
18. Permana I., Said F.M., Umar N.S., Budhiana J. Disaster preparedness education among community: What is effective? An integrative literature review. *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences*. 2022. Vol. 10(G). pp. 1–8. DOI: 10.3889/oamjms.2022.8373.
19. Rahman A., Munadi K. Communicating risk in enhancing disaster preparedness: A pragmatic example of disaster risk communication approach from the case of Smong story. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 273. Issue 1. Art. No. 012040.
20. Rod S.K., Botan C., Holen A. Communicating risk to parents and those living in areas with a disaster history. *Public Relations Review*. 2011. Vol. 37. Issue 4. pp. 354–359. DOI: 10.1016/j.pubrev.2011.08.012.
21. Shannon C. Understanding community-level disaster and emergency response preparedness. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*. 2015. Vol. 9. Issue 3. pp. 239–244. DOI: 10.1017/dmp.2015.28.
22. Spence P.R., Lachlan K.A. Reoccurring challenges and emerging threats. In: *The handbook of international crisis and risk communication research*. 2025. pp. 216–227.
23. Topping K., Hayashi H., Siembieda W., Boswell M. Special issue on “building local capacity for long-term disaster resilience” Toward Disaster Resilient Communities. *Journal of Disaster Research*. 2010. Vol. 5. Issue 2. pp. 127–129.
24. Whittaker S., Khalfan M.M.A., UIHaq I. Developing community disaster resilience through preparedness. *International Journal of Critical Infrastructures*. 2020. Vol. 16. Issue 1. pp. 1–18.
25. Zaman M.O., Raihan M.M.H. Community resilience to natural disasters: A systemic review of contemporary methods and theories. *Natural Hazards Research*. 2023. Vol. 3. Issue 3. pp. 583–594. DOI: 10.1016/j.nhres.2023.05.003.
26. Zhai L., Lee J.E. Exploring and enhancing community disaster resilience: Perspectives from different types of communities. *Water*. 2024. Vol. 16. Issue 6. Art. No. 881. DOI: 10.3390/w16060881.

DOI: 10.46698/VNC.2025.35.96.001

Original paper

Integrated application of geophysical methods in the South Caspian basin (based on the Bulla-Deniz oil and gas field)

G.J. Yetirmishli¹, S.E. Kazimova¹, A.V. Samedzade²

¹ National Academy of Sciences of Azerbaijan, Republican Seismic Survey Center,
123 G. Javid Str., Baku AZ1001, Azerbaijan, e-mail: sabina.k@mail.ru;

² Baku State University, 33 Z. Khalilov Str., Baku AZ1148, Azerbaijan,
e-mail: agazade_afaq@mail.ru

Received: 26.02.2025, revised: 15.05.2025, accepted: 19.05.2025

Abstract: The relevance of the work is due to the fact that the studied territory is located in the collision zone of the Eurasian and Arabian lithospheric plates, where complex structures are formed that have a direct impact on fluid migration, trap formation and seismic activity. Considering that the main hydrocarbon reserves are concentrated at the intersection of tectonically active zones, it is important to identify geodynamic patterns in the Bulla-Deniz field zone, which is one of the largest in the region. This is of key importance both for assessing seismic risks and for planning rational resource extraction. **Aim.** This paper considers the geological and tectonic settings of the Bulla-Deniz structure, as well as the results of seismic studies that are of critical importance for the development of the country's oil and gas industry. **Methods.** The article uses a comprehensive application of geophysical, seismological, seismic tomographic, geodynamic methods, GPS monitoring and drilling to form a holistic view of the geological structure and geodynamic processes of the Bulla-Deniz field. Geophysical studies revealed key anomalies, seismology and seismic tomography clarified deep processes, GPS data described the kinematics of plates, and drilling provided direct data on productive layers. These methods provide a scientific basis for seismic risk assessment, geodynamic situation and efficient development of the field, emphasizing its strategic importance for the oil and gas industry of Azerbaijan. **Results.** Gravity studies have revealed the presence of both regional and local anomalies (Dibrar and East Dibrar maxima) associated with the deep structure and faults. These zones may play an important role in the formation of structures favorable for hydrocarbon accumulation. Seismological data indicate stable activity in the region, especially at depths greater than 35 km. The main types of movements are extension and subsidence, indicating complex earthquake generation mechanisms and potential seismic hazard. Comparison of earthquake focal mechanisms with GPS observations confirms the predominance of extension and strike-slip faults characteristic of the plate collision zone in the Central Caspian Basin. The deep structure of the region includes thin oceanic crust covered by thick sedimentary strata, which creates favorable conditions for the formation of oil and gas systems in depression and fault zones.

Keywords: Bulla-Deniz oil and gas field, the South Caspian Basin (SCB), geodynamical structure, gravitational field, seismological processes, oil and gas potential.

For citation: Yetirmishli G.J., Kazimova S.E., Samedzade A.V. Integrated application of geophysical methods in the South Caspian basin (based on the Bulla-Deniz oil and gas field). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 142-154. DOI: 10.46698/VNC.2025.35.96.001

УДК 622.276

DOI: 10.46698/VNC.2025.35.96.001

Оригинальная статья

Комплексное применение геофизических методов в Южно-Каспийском бассейне (на основе нефтегазового месторождения Булла-Дениз)

Г.Дж. Етирмишли¹, С.Э. Казимова¹, А.В. Самедзаде²

¹ Национальная Академия Наук Азербайджана, Республиканский Центр Сейсмологической Службы, Республика Азербайджан, AZ1001, г. Баку, ул. Г. Джавида, 123, e-mail: sabina.k@mail.ru;

² Бакинский государственный университет, Республика Азербайджан, AZ1148, г. Баку, ул. З. Халилова, 33, e-mail: agazade_afaq@mail.ru

Статья поступила: 26.02.2025, доработана: 15.05.2025, принята к публикации: 19.05.2025

Резюме: Актуальность работы обусловлена тем, что исследуемая территория расположена в зоне столкновения Евразийской и Аравийской литосферных плит, где формируются сложные структуры, оказывающие прямое влияние на миграцию флюидов, формирование ловушек и сейсмическую активность. Учитывая, что именно на пересечении тектонически активных зон сосредоточены основные запасы углеводородов, выявление геодинамических закономерностей в зоне месторождения Булла-Дениз, являющегося одним из крупнейших в регионе, имеет ключевое значение, как для оценки сейсмических рисков, так и для планирования рациональной добычи ресурсов. **Цель исследования.** В данной работе рассматриваются геологические и тектонические условия структуры Булла-Дениз, а также результаты сейсмических исследований, имеющие решающее значение для развития нефтегазовой отрасли страны. **Методы исследования.** В статье использовано комплексное применение геофизических, сейсмологических, сейсмотомографических, геодинамических методов, GPS-мониторинга и бурения, что позволило сформировать целостное представление о геологической структуре и геодинамических процессах месторождения Bulla-Deniz. Геофизические исследования выявили ключевые аномалии, сейсмология и сейсмотомография уточнили глубинные процессы, GPS-данные описали кинематику плит, а бурение предоставило прямые данные о продуктивных слоях. Эти методы обеспечивают научную основу для оценки сейсмических рисков, геодинамической ситуации и эффективной разработки месторождения, подчеркивая его стратегическую важность для нефтегазовой промышленности Азербайджана. **Результаты.** Гравиметрические исследования показали наличие как региональных, так и локальных аномалий (максимумы Дибрар и Восточный Дибрар), связанных с глубинным строением и разломами. Эти зоны могут играть важную роль в формировании структур, благоприятных для накопления углеводородов. Сейсмологические данные указывают на устойчивую активность в регионе, особенно на глубинах более 35 км. Основные типы движений – растяжение и погружение, что говорит о сложных механизмах генерации землетрясений и потенциальной сейсмической опасности. Сопоставление механизмов очагов землетрясений с GPS-наблюдениями подтверждает преобладание растяжения и сдвигов, характерных для зоны столкновения плит в Центральной Каспийской впадине. Глубинное строение региона включает тонкую океаническую кору, перекрытую мощными осадочными толщами, что создаёт благоприятные условия для формирования нефтегазоносных систем в зонах прогибания и разломов.

Ключевые слова: нефтегазовое месторождение Булла-Дениз, Южно-Каспийская впадина (ЮКВ), геодинамическое строение, гравитационное поле, сейсмологические процессы, нефтегазовый потенциал.

Для цитирования: Етирмишли Г.Дж., Казимова С.Э., Самедзаде А.В. Комплексное применение геофизических методов в Южно-Каспийском бассейне (на основе нефтегазового месторождения Булла-Дениз). *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 142-154. DOI: 10.46698/VNC.2025.35.96.001

Introduction

The territory of Azerbaijan was assessed by seismic intensity at 8–9 points. The zone is located in the seismic Alpine-Himalayan fold belt and covers its seismically active part. In recent years, the interest of international companies in the Caspian sector of Azerbaijan has increased further, and more in-depth research has been carried out using various techniques. Accordingly, a deeper study of the zone has begun and more accurate information about the geological and geophysical structure of the area has been obtained. The basis of the formed database is two-dimensional and three-dimensional seismic data. As a result of all this extensive database, it has become possible to assess the hydrocarbon potential of the zone.

The Bulla Deniz oil and gas field, which is the basis of the study, covers the southwestern part of the Caspian Sea, is located 80 km south of Baku and 35–40 km southeast of the Oil Rocks. In this regard, the study of the field is of great importance, and as a result of the 6.8-magnitude earthquake that occurred in Azerbaijan in 2000, the installation of US-made “Kinometrics” type equipment in the country created conditions for a more in-depth study of both the seismological-geological and geological-tectonic properties of the Bulla-Deniz structure [Aliyev et al., 2010; Guliyev et al., 2015a; Mammadov, Guliyev, 2008; Guliyev et al., 2015b; Guliyev et al., 2012].

Bulla-Deniz oil and gas field

The Bulla-Deniz oil and gas field was first discovered in 1973, and exploitation began in 1975. Their location at such a depth, as well as the presence of layers with complex geological structures, sometimes causes serious difficulties [Guliyev et al., 2016]. However, the geophysical studies conducted have made it possible to more accurately study the geological structure of the productive layer. This has ensured more efficient extraction of hydrocarbons in the research area, as well as in the fields adjacent to it [Kadirov, 2006]. In a result of geological studies, it was determined and revealed that it is distinguished by high anomalous reservoir pressures. In recent years, scientific research conducted on this structure has been aimed at a detailed study of the geological properties of the layers, their petrophysical indicators and production capabilities. [Guliyev, Alizadeh, 2020; Abuzarova, 2024; Ahmadov, 2020; Yusifov et al., 2015]. The field is considered more relevant than other fields in terms of hydrocarbon production. An example of this is the well No. 123 drilled in the field with a depth of 6,132 meters. This well was drilled in 2017, produced 104,000 tons of condensate and 472 million cubic meters of gas in 2017 alone. In total, 69.9 billion cubic meters of gas and 12.4 million tons of oil and condensate were produced until last year [Guliyev, Alizadeh, 2020; Abbasov, Guliyev, 2019]. Based on all these indicators, it can be said how important the field is in the country’s energy security and the international energy market. Also, the Bulla Deniz oil and gas field plays an important role in further strengthening the role of Azerbaijan in the international arena from an economic perspective [Guliyev et al., 2016; Feyzullayev, Mammadova, 2022; Yusubov, Shikhmammadova, 2022].

Research methods

The Bulla-Deniz field is located in the South Caspian basin within the shelf zone of the Caspian Sea and complex research methods were used to assess the geological-structural features, tectonic structure and seismic activity of this field. This includes geophysical, seismological, seismic tomographic and geodynamic approaches, as well as analysis of GPS monitoring data and data obtained as a result of drilling operations. Each method provides an indepth analysis of geodynamic processes and productive layers through specific tools and procedures [Sikorskaya, 2025; Serikova, Allanazarova, 2023].

The Bulla-Deniz field is an area with a complex geological structure. For the first time, gravimetric studies were carried out here in 1952 with high-precision instruments. As a result of these studies, anomalously high reservoir pressures were detected and it was determined that these reservoir pressures can cause various technical and safety problems during the exploitation or drilling process. As a result of the conducted research, an upper pressure zone (600–1200 m) and a deep pressure zone (approximately 5 km or deeper) were discovered here [Feyzullayev, Lerche, 2009; Mammadov, 2022; Mirzayev et al., 2019].

Earthquake monitoring was carried out through the network of stations of the Seismological Survey Center of the Republic of Azerbaijan. Through this network, earthquakes with a magnitude of $M \geq 5.0$ that occurred in Baku and in the Caspian Sea were recorded. Then, data were collected based on the fund data received from the digital stations of the Seismological Survey Center of the Republic of Azerbaijan for 2003–2024 and seismicity analysis was conducted using this data. Also, the depth of earthquake occurrence during these years was found and a seismicity map of earthquakes with magnitudes $m_l \geq 0.1$ and $m_l \geq 3.0$ was compiled. The results of all these analyses made it possible to build a diagram reflecting the relationship between the number of earthquakes that occurred and the energy released at that moment. Thus, 192 earthquakes were detected in 2023, and peaks of activity were also detected in 2011, 2020 and 2023. The obtained data were collected in a database up to a depth of 70 km and two-stage (2D) seismic tomographic sections were prepared using the ArcGIS program. Analysis of geodynamic processes and GPS observations played a key role in determining the focal mechanisms of tectonic movements and earthquakes. The analysis of focal mechanisms conducted using the “MomentTensor” program showed that during 2003–2024, extensional and subduction-type movements predominated in the Central Caspian basin, while uplifts accompanied by faults were observed in the North Caspian zone. GPS monitoring was carried out using the GAMIT software and the directions and speeds of tectonic plate movements were determined with high accuracy. For this purpose, the Regional Seismic Stations Network was used.

Characteristics of the Gravity Field of the South Caspian Basin

One of the indicators reflecting the complex geodynamic and tectonic structure of the South Caspian Basin is the gravity field of the zone. Since the South Caspian Basin is promising in terms of oil and gas, the gravity anomalies observed in the area have aroused interest by a number of researchers. The cause of the -193 mGal gravity anomaly observed in the center of the Caspian Basin was determined to be the subsidence of the continental plates. It was also found that the reason for the existence of the gravity model is related to the location of the basin in an active tectonic zone [Kadirov, 2006].

In the Caspian Sea, the gravity anomaly is mainly estimated higher in the Middle Caspian, with more anomalous areas collected in the western part of the basin. Here, the highest gravity anomaly value was determined to be 60 mGal, and the lowest anomaly value was -130 mGal. In the study area, the thin consolidated crust and the gravity minimum coincide. As a result of the studies, it is assumed that a Benioff zone existed between the Lesser Caucasus and South Caucasus massifs [Guliyev et al., 2012]. The Bulla Deniz oil and gas field area of the South Caspian Basin is characterized by a relatively weak-medium gravity anomaly value. It varies between approximately -80 mGal and -10 mGal (fig. 1).

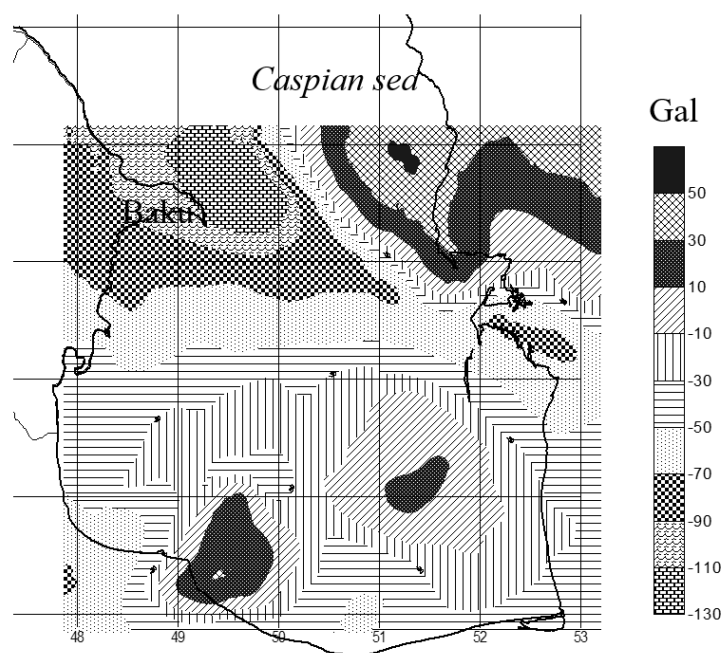


Fig. 1. South Caspian Gravity Anomalies / Гравитационные аномалии Южного Каспия

Seismological investigation

Since ancient times, the region is considered to be seismically active and has experienced major earthquakes. They include the 957 Caspian earthquake, which resulted in coastal alterations and the formation of new islands, the 1990 magnitude 7.4 Caspian earthquake in Iran, which resulted in fatalities, the 2000 magnitude 6.8 Caspian earthquake in Azerbaijan, which resulted in migration of seismic activity and stress variations, and so on. An example can be given [Yetirmishli et al., 2022].

Earthquake data of the “Bureau of Earthquake Research” of the Republic Seismological Service Center of the National Academy of Sciences of Azerbaijan were analyzed during the years 2003–2024, and using the fund data, earthquakes that occurred in the research area during those years were selected and a graph reflecting the statistics of earthquakes with the seismic energy released at the time of occurrence of those earthquakes was created. (Graph 2). The established graph shows the dependence between the number of earthquakes and the energy released at the moment of their occurrence. Here, the number of earthquakes is shown as red columns, and the amount of released energy is shown as blue lines. During the analysis of the visual image, it was observed that the number of earthquakes in the study area was the highest in 2011 (157 earthquakes) and 2023 (192 earthquakes), but the number of earthquakes between 2003–2024 reached its highest level

in 2023. However, weak seismic activity was observed in 2003–2009. Moderate seismic activity was observed in 2010, 2024 and 2012–2022.

The graph (fig. 2) reflecting the statistics of earthquakes in the Caspian Sea during 2003–2024 shows the changes between the number of seismic events by year (red columns) and the seismic energy released during that period (blue line). Visual analysis shows that the number of earthquakes has increased significantly since 2010 and this increase has continued in the following years, reaching a peak in 2023 with 192 earthquakes. The years 2020 and 2022 were also seismically active periods – in 2020, both the number of earthquakes and the amount of energy released increased dramatically. If we look at the amount of allocated energy, although the amount of allocated energy in 2011 is consistent with the number of earthquakes, it seems that in 2023 this agreement is not observed. At the same time, high seismic energy was released in the years when little seismic activity was observed. As a result of all this, there was no regular increase or decrease in the energy released by the number of earthquakes during these years. This can be directly based on the distribution characteristics of the cells as well as the mechanisms of their formation.

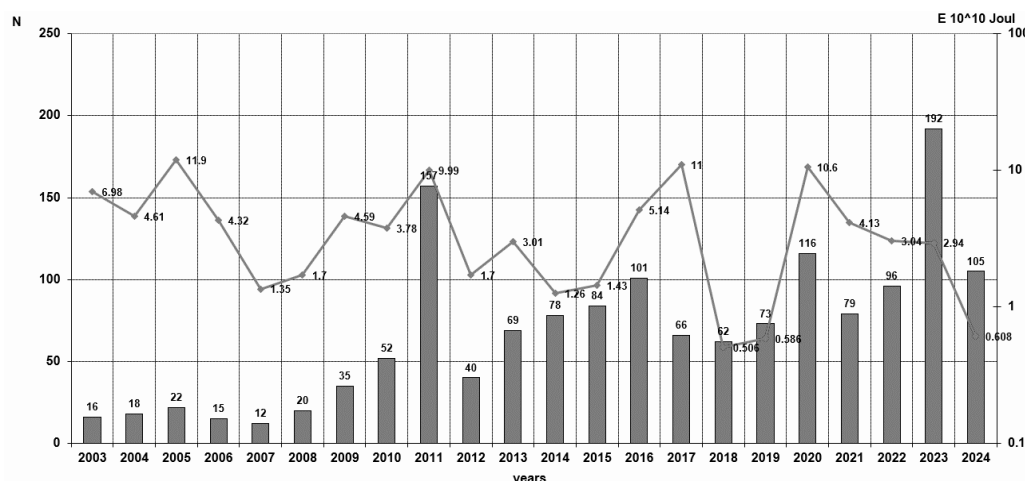


Fig. 2. Graph showing the relationship between the number of earthquakes and seismic energy released in the Caspian Sea from 2003 to 2024 / График, показывающий зависимость между количеством землетрясений и выбросами сейсмической энергии в Каспийском море с 2003 по 2024 год

Distribution of earthquake hypocenters by depth and distribution by region

Based on the number of earthquakes that occurred in the study area, their depths were selected by us and a diagram reflecting the relationship between them was constructed. (fig. 3). Based on the constructed diagram, the distribution of earthquakes by region was assessed. As a result of the comparative analysis, it was found that a large part of the earthquakes occurred in layers 30 km and deeper. Thus, it is possible to make a conclusion about the distribution of the earthquakes that occurred according to the tectonic structure. Unlike the relationship between the number of earthquakes and the energy released, a certain regularity was found between the number of earthquakes and the depth at which they occurred. That is, the geodynamic activity formed in deeper layers causes the occurrence of seismic events.

In figure 4, using the data of the Seismological Service Center of the Republic of Azerbaijan, earthquakes recorded in the Caspian Sea area during 2003–2024 were

selected according to their intensity and maps were drawn up accordingly. On the left side, a map of the epicenters of earthquakes that occurred during the years 2003–2024 is compiled, and it is shown that low-magnitude earthquakes occurred in the central and southeastern part of the Caspian Sea. On the right side, the distribution of earthquakes with a magnitude of $m_l \geq 3.0$ is reflected. Thus, it can be seen that strong earthquakes in the zone have spread from the northeast to the southwest during these years. Thus, it can be said about the uneven distribution of seismic activity in the area.

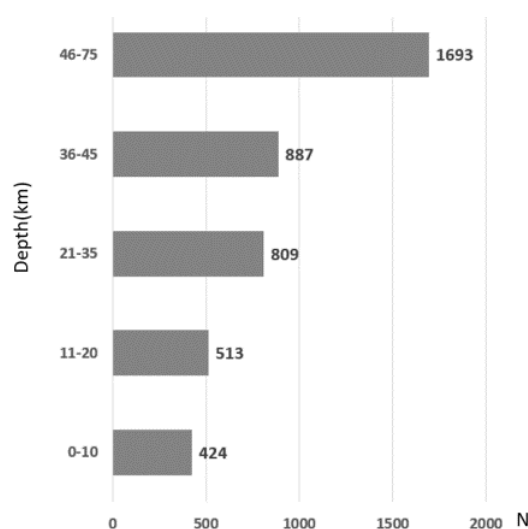


Fig. 3. Graph showing relationship between number of earthquakes and depth / График, показывающий зависимость между количеством землетрясений и глубиной залегания

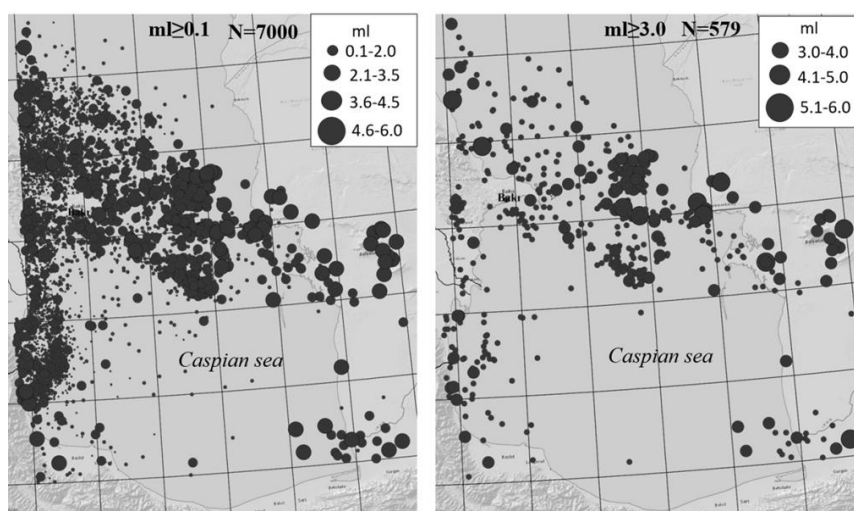


Fig. 4. Map of earthquake epicenters in Bulla-Deniz for 2003–2024 / Карта эпицентров землетрясений в Булла-Дениз на 2003–2024 гг.

In the South Caspian Basin, the majority of hydrocarbons are found in fault zones and their contact zones. For example, Bulla-Deniz, Gunashli, Neft-Dashlari, etc., which are located at the intersection of active tectonic zones or near them, constitute the basis of hydrocarbon production in the basin [Reynolds, Simmons, 2007].

In general, researchers have determined that the transition zones between the Karabogaz Uplift and the South Caspian Depression had a fragmented block-structural

model due to these tectonic activities [Ghassemi, Garzanti, 2019].

The map reflecting the distribution of seismic activity covers the period from 2003 until 2023. The right part of the constructed maps shows the level of seismic activity, expressed in different colors, increasing from minimum to maximum. Seismic activity in the Bulla-Deniz oil and gas field in 2003–2013 was estimated to be moderate at SSA 0.4–1.2, and in 2014–2023 at SSA 0.3–1.1 (fig. 5).

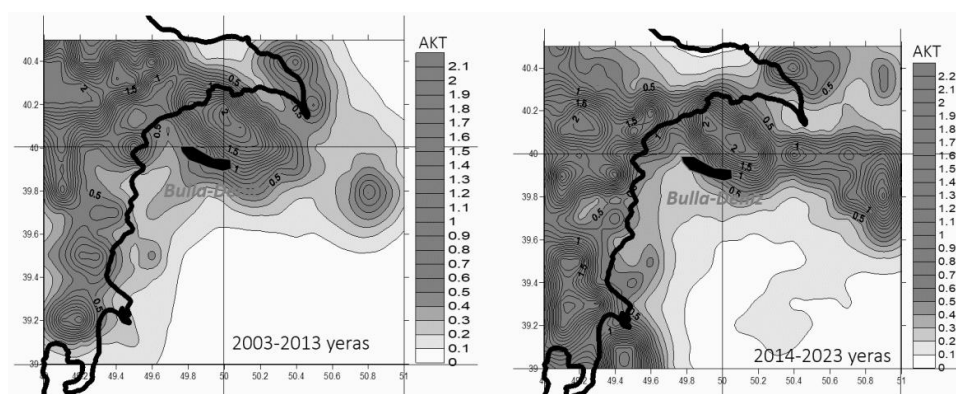


Fig. 5. Map of Seismic Activity on the Southern Caspian for the Periods 2003–2013 and 2014–2023 / Карта сейсмической активности на Южном Каспии за периоды 2003–2013 и 2014–2023 гг.

When analyzing the areas with high seismic activity in the region from 2003 to 2013, it can be seen that high activity is mainly concentrated in the central and NW parts of the study area. The total activity was determined to be about 1.5. However, when looking at the seismic activity in the study area during 2014 and 2023, it can be seen that the increase in activity occurred mainly in the central and SW parts. Based on all this, seismic activity has also increased in the Bulla-Deniz area and the seismic activity in the area was above 1.5. As can be seen from the maps, a decrease and redistribution of seismic activity has been observed in the area over the past 20 years. Even in the southern expanse of the area, where seismic activity was identified relatively little or not at all before the indicated period, newer active zones were created during this period. If we look at the northern part of the region, compared to the southern zone, it was observed that the seismic activity decreased relatively during 2003 and 2013. From 2013 to the present, seismicity in the region has expanded in the east and south directions. Thus, when looking at the research area, it was observed that the seismic activity remained stable, and even increased slightly. The maps show long-term changes in seismic activity, which are important for earthquake prediction and geodynamic assessment of the region. Figure 6 shows two seismic profiles. These seismic profiles reflect the distribution of earthquake epicenters based on depths. In the left part a map of seismic events is presented with earthquake epicenters classified in different colors according to their strength. The black lines numbered 1 and 2 reflect the profiles and directions of their intersections. In the upper right part, the distribution of earthquake depths in the Bulla-Deniz area is shown. The image shown is set in a southwest (SW) direction. In the lower left part, 3.0 magnitude earthquakes are shown as small circles, and 4.0 to 5.0 magnitude earthquakes are shown as red circles. Looking at figure 6, it can be seen that high-magnitude earthquakes occur in the depth range between 0 and 50 kilometers. However, a small number of seismic activity occurs at greater depths. Looking at the distance axis, it is observed that stronger earthquakes occur in the interval from 150 to 400 kilometers.

The profile shows a similar distribution of seismic activity, with a slightly different location. Here, however, the main seismic activity occurred in the interval from 10 to 50 kilometers.

Seismic activity in this area is of great importance for the efficiency of hydrocarbon production. Therefore, when looking at the range of earthquake occurrence, it is possible to observe that they occur at depths of 0-50 km. The active fault zones here are mainly associated with areas of increasing earthquake concentration. Earthquakes with a magnitude of 4.0–5.0, shown as large circles occur more frequently at shallow and intermediate depths and are distributed throughout the profile.

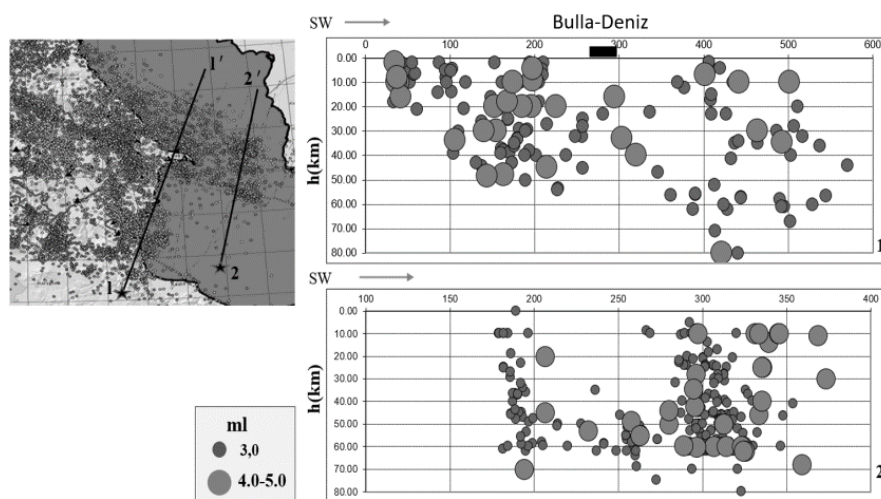


Fig. 6. Map of Caspian earthquake epicenters, along with two seismic profiles showing earthquake distribution by depth / Карта эпицентров каспийских землетрясений, а также два сейсмических профиля, показывающих распределение землетрясений по глубине

Earthquake focal mechanisms

The formation of earthquake focal mechanisms was also analyzed by us. Seismological studies were conducted in the research area, and a number of conclusions were drawn based on the analysis of the focal mechanisms of the earthquakes that occurred. The analysis was carried out comprehensively, taking into account tectonic elements, seismic faults, etc. As a result of the analysis, it was determined that in general, expansion-deepening movements prevail in the region, which is characteristic of expansion geodynamic conditions.

Deep structure of the studied region

The South Caspian Depression has a deep structural structure and is a tectonic depression consisting of sedimentary rocks. The study area in the current structural map, the Caspian region is characterized by a heterogeneous and diverse thickness of sedimentary rocks of more than 10 km belonging to the last quaternary period and is characterized by high activity both in terms of sedimentary dynamics and tectonic dynamics. The thickness of sedimentary rocks formed as a result of the sedimentary accumulation process in the region is estimated to be 25 km or more. The South Caspian megadepression is located on the oceanic crust and is characterized by a high rate of sedimentation. In addition, the zone has a complex tectonic structure as a result of the analysis of the above-mentioned depth characteristics. The sedimentary complexes located here have created a favorable

environment for the generation of hydrocarbons. Also, the earthquakes that occurred in the zone are associated with the subduction process [Abdullayev et al., 2023; Jackson et al., 2002].

Based on the background data of the Azerbaijan Republic Seismological Service Center, the depth, strength and other parameters of the earthquakes were analyzed, and the seismotomographic structure was studied based on all these data. That is, based on the seismic waves occurring in the study area, a three-dimensional model of the zone was built. Through seismography, the opaque properties of various geological structures, that is, the characteristics of anomalies, are studied. As a result of seismographic analyses conducted in the zone, it was determined that most of the earthquake foci that occurred were formed mainly at a depth of 50–70 km. Also, the presence of coke-like geological structures in the zone and the presence of a tectonic structure were proven. Also, a deep subduction zone was observed in the study area. Here, the transition zone and the Mokhorovicic boundary, unlike other geological zones, is located at a depth of 50–55 km [Abdullayev et al., 2023; Jackson et al., 2002; Kazimova et al., 2024; Kerimova, Samadli, 2024; Huseynov et al., 2019]. Thus, the deep structures of the Absheron-Balakany system can be shown. Here, the crust belonging to both the Mesozoic and Cenozoic eras was formed. However, the general nature of the formation is associated with a thin oceanic crust. Here, the thickness of the oceanic crust is estimated to be approximately 35 km. Deeper horizons consist of sediments covered with a basalt layer. The thickness of the layer here is estimated to be less than 22 km. These sediments were formed mainly in the modern period.

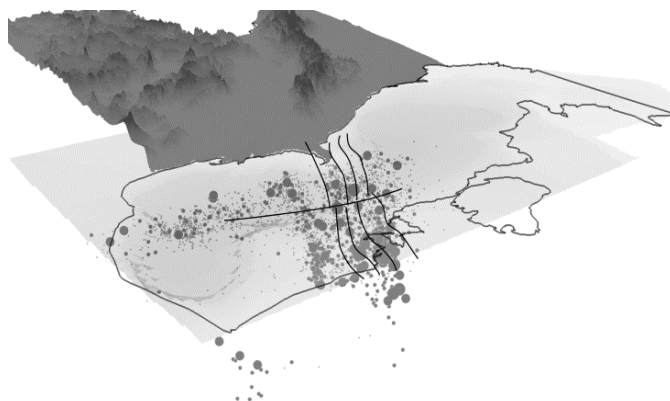


Fig. 7. 3D model of earthquake hypocenters occurring in the Caspian Sea in 2017–2024 / 3D-модель гипоцентров землетрясений, произошедших в Каспийском море в 2017–2024 гг.

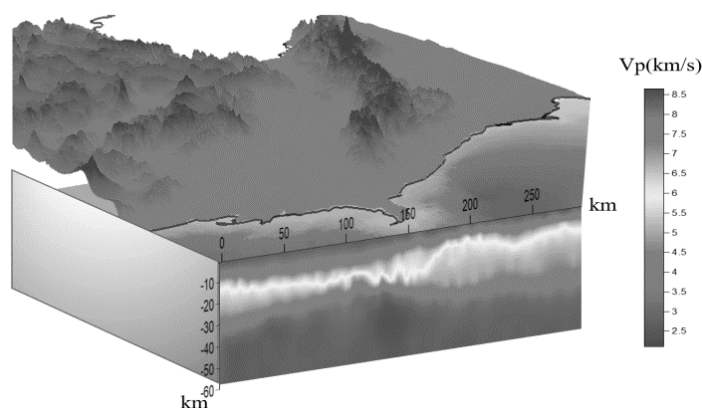


Fig. 8. 2D seismic tomography section in the SW to NE direction / 2D сейсмотомографический разрез в направлении SW-NE

Discussion of results

Based on the above data, it can be said that the geodynamic activity of the study area is formed as a result of the interaction of tectonic plates as well as geological processes taking place in deep layers. The distribution of earthquake focal points in the Southern Caspian Basin with respect to depth and the distribution of tectonic stresses both near the surface and on deep faults have an impact on the assessment of seismic risk.

Therefore, additional studies are needed on fault mechanisms and stress transfer resulting from the discrepancy between the frequency of earthquakes and the amount of energy released to the region during earthquakes. The role of the collision zone is very important in the tectonic model of the area, additional forces within the basin (from the Arabian plate) and geodynamic processes create a complex stress field. This regime is directly responsible for creating favorable conditions for oil and gas accumulation. A thin crust and a thick sedimentary cover have been identified in the zone by seismic tomography, and it has been observed that the thick sedimentary cover increases the hydrocarbon potential.

Results

Comprehensive analysis of geophysical, seismological and tectonic data for the Southern Caspian Basin region, including the Bulla-Deniz region, allows us to identify a number of stable patterns that characterize the geodynamic development and oil and gas potential of the study area.

The results of gravimetric studies revealed the presence of regional and local anomalies, in particular the Dibrar and East Dibrar maxima, which reflect the features of the deep structure and interaction of tectonic blocks. The structure of the gravity field is closely associated with active uplift faults and zones, which confirms their role in the formation of tectonic relief and potential traps for hydrocarbons.

Seismological analysis showed stable seismic activity in the region over the last two decades with a marked concentration of epicenters at depths of more than 35 km. The high density of hypocenters in the subduction zone is particularly significant and may indicate the presence of active deep processes and possible seismic hazard. Data on the distribution pattern of earthquake foci and the released energy allow us to conclude that the mechanisms of seismic event formation are heterogeneous, with expansion and subsidence predominating.

Analysis of earthquake focal mechanisms in comparison with modern GPS observational data confirms the predominance of extensional and shear movements in the Central Caspian Depression. This is consistent with the model of tectonic interaction of lithospheric plates in the region, where the Eurasian and Arabian plate converge.

Conclusions

The South Caspian Basin is a geologically dynamic region characterized by significant gravity and magnetic anomalies, intense seismic activity and complex plate interactions. Integrated analysis of geophysical and seismic data reveals a basin shaped by extensional tectonics, deep fault systems and compressional forces from converging plates. Persistent seismic activity, particularly in the Bulla-Deniz area, highlights the need for ongoing hazard monitoring and assessment. The basin's thin crust and thick sedimentary sequences, along with fault-controlled structures, make it a key target for hydrocarbon exploration.

Future research should focus on refining fault models, improving earthquake prediction and understanding deeper crustal dynamics to enhance seismic risk management and resource development in this critical region.

References

1. Kazimova S.E., Guseinzade G.E., Mammadova P.J. Modern seismogeodynamics of Absheron oil and gas region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 1. pp. 36–48. DOI: 10.46698/VNC.2024.77.24.003. (In Russ.)
2. Serikova U.S., Allanazarova M.A. Prospects for oil and gas exploration in the deeply buried deposits of the South Caspian offshore area. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2023. Vol. 2. pp. 33–46. DOI: 10.32454/0016-7762-2023-65-2-33-46. (In Russ.)
3. Sikorskaya S.V. Regularities of hydrocarbon deposit distribution and formation in the North-Donbass gas-bearing area. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 1. pp. 151–165. DOI: 10.46698/VNC.2025.21.52.013. (In Russ.)
4. Abbasov A.M., Guliyev I.S. Assessment of high-yield deep wells in offshore gas-condensate fields of Azerbaijan: A case study of Bulla-Deniz. *Energy Reports*. 2019. Vol. 5. pp. 850–861. DOI: 10.1016/j.egyr.2019.07.015.
5. Abdullayev N.R., Bertoni C., Javadova A.S., Kazimova S.E., Walker R.T., Huseynova Sh.M. Evolution of the South Caspian Basin – evidence from offshore seismic and onshore active tectonics. *ANAS Transactions. Earth Sciences*. 2023. Special Issue. pp. 37–40. DOI: 10.33677/ggianasconf20230300009.
6. Abuzarova A.H. Estimation of layer parameters based on GWS data in the Bulla-Deniz offshore field. *Azerbaijan Oil Industry Journal*. 2024. Vol. 4. pp. 15–18. DOI: 10.37474/0365-8554/2024-04-15-18.
7. Ahmadov E.H. Comparative analysis of production potential in Bulla-Deniz and Umid gas-condensate fields. *Azerbaijan Oil Industry Journal*. 2020. Vol. 8. pp. 21–26. DOI: 10.37474/0365-8554/2020-8-21-26.
8. Aliyev A.A., Gasimov I.F., Ismayilov Sh.M. *Oil and gas fields of Azerbaijan*. Baku. Nafta-Press. 2010. pp. 45–67.
9. Feyzullayev A., Lerche I. Occurrence and nature of overpressure in the sedimentary section of the South Caspian Basin, Azerbaijan. *Energy Exploration & Exploitation*. 2009. Vol. 27. Issue 5. pp. 345–361. DOI: 10.1260/0144-5987.27.5.345.
10. Feyzullayev A.A., Mammadova I.M. Influence of seismotectonic processes on oil and gas production dynamics: South Caspian Basin case study. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022. Vol. 58. pp. S140–S158. DOI: 10.1134/S0001433822130035.
11. Ghassemi M.R., Garzanti E. Geology and geomorphology of Turkmenistan: A review. *Geopersia*. 2019. Vol. 9. Issue 1. pp. 125–140. DOI: 10.22059/GEOPE.2018.265613.648416.
12. Guliyev I.S., Alizadeh R.A. Hydrocarbon potential and well performance in the Bulla Deniz gas-condensate field, South Caspian Basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. Vol. 195. pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107776.
13. Guliyev I.S., Kerimov V.Y., Mustaev R.N. Fundamental challenges of oil and gas localization in the South Caspian Basin. *Doklady Earth Sciences*. 2016. Vol. 471. Issue 1. pp. 1109–1112. DOI: 10.1134/S1028334X1611009X.
14. Guliyev I.S., Mammadov A.A., Aliyev H.Sh. Seismicity and tectonic evolution of the Caspian Basin: Implications for oil and gas exploration. *Journal of Geophysical Research*. 2012. Vol. 117(B3). pp. 1–15.
15. Guliyev I.S., Mammadov A.A., Aliyev H.Sh. Seismological and geological characteristics of the Bulla Deniz oil field. *SOCAR Geoscience Journal*. 2015a. No. 15. pp. 112–135.
16. Guliyev I.S., Mammadov A.A., Aliyev H.Sh. Seismological and geological characteristics of the Bulla Deniz oil field. *SOCAR Geoscience Journal*. 2015b. No. 15. pp. 112–135.

17. Huseynov B., Salmanov A., Maharramov B. Oil-gas-geological zoning of Azerbaijan's land area. Baku. Mars Print. 2019. 315 p.
18. Jackson J.A., Priestley K., Allen M.B., Berberian M. Active tectonics of the South Caspian Basin. *Geophysical Journal International*. 2002. Vol. 148. Issue 2. pp. 214–245. DOI: 10.1046/j.1365-246X.2002.01005.x.
19. Kadirov F.A. Nature of gravitational anomaly in the South Caspian Basin. In: 68th EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC. 2006. Art. No. P325. DOI: 10.3997/2214-4609.201402102.
20. Kerimova K.A., Samadli U.Y. Determination of petrophysical parameters in promising horizons of the Bulla-Deniz field using Techlog software. *Geophysical Journal*. 2024. Vol. 46. Issue 4. pp. 149–160. DOI: 10.24028/gj.v46i4.310472.
21. Mammadov A.A., Guliyev I.S. Tectonic and geodynamic conditions of the Caspian Basin. Baku. Elm Publishing. 2008. pp. 90–100.
22. Mammadov E.Kh. Prevention of clay flow from upper formations and necking of production string. *Azerbaijan Oil Industry Journal*. 2022. Vol. 12. pp. 18–21. DOI: 10.37474/0365-8554/2022-12-18-21.
23. Mirzayev M., Gasimova S., Gasimov I. Pore pressure and optimum mud weight estimation using offset wells in Bulla Deniz Field, Azerbaijan: Case study. In: Paper presented at the SPE Annual Caspian Technical Conference. Baku. Azerbaijan. October 16-18, 2019. Society of Petroleum Engineers. Art. No. SPE-198392-MS. pp. 1–10. DOI: 10.2118/198392-MS.
24. Reynolds M., Simmons M.D. Tectonostratigraphic evolution of the South Caspian Basin: Implications for hydrocarbon systems. *Marine and Petroleum Geology*. 2007. Vol. 24. Issue 6. pp. 383–400. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2007.01.004.
25. Yetirmishli G., Kazimova S., Kazimov I. Oil and gas potential and modern seismicity of the Azerbaijan sector of the Caspian Sea. *Geophysical Journal*. 2022. Vol. 45. Issue 1. 125–136. DOI: 10.24028/gj.v45i1.275184.
26. Yusifov M.H., Mamedova M.A., Shirali I.Y., Balayev E.S. Oil-gas potential of the lower part of Productive Series in light of new data from Bulla-Deniz field. *Azerbaijan Oil Industry Journal*. 2015. Vol. 11.
27. Yusubov N.P., Shikhmammadova T.N. Hydrocarbon system of the South Caspian Depression. *Geophysical Journal*. 2022. Vol. 44. Issue 3. pp. 87–95. DOI: 10.24028/gj.v44i3.261971.

УДК: 553.69:552.13

DOI: 10.46698/VNC.2025.14.75.001

Оригинальная статья

Минералого-петрографическая зональность горелых горных отвалов угольных шахт (Восточный Донбасс)

И.А. Артемов 

Южный научный центр Российской академии наук, Россия, 344006,
г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: artemovia@gmail.com

Статья поступила: 29.04.2025, доработана: 29.05.2025, принята к публикации: 02.06.2025

Резюме: Актуальность работы. Отходы угледобычи являются перспективным вторичным сырьем, использование которого во многом ограничено разнообразием и непостоянством минерального состава в объеме породных отвалов. **Цель исследования.** Цель работы – определить минералого-петрографическую зональность горелых горных отвалов угольных шахт Восточного Донбасса. **Материалы и методы.** Изучение вещественного состава проведено методами электронно-зондовых исследований и рентгенофазового анализа. **Результаты работы.** В статье приводятся результаты изучения минералого-петрографической зональности горелых пород терриконов Восточного Донбасса; по составу они принадлежат к песчано-глинистому литологическому типу. Породные отвалы горят за счет экзотермической деструкции сульфидов с выделением серы и окисления частиц угля, и значительная часть является перегоревшей, что приводит к трансформациям минерального состава пород, способствующим удалению части вредных компонентов (сульфиды и пр.), повышению однородности петрографического состава и физических свойств пород, а также появлению ряда их новых свойств. Среди пирометаморфических пород по мере удаления от горящего ядра выделяются зоны с характерными минеральными ассоциациями: для высокотемпературной внутренней зоны (температура выше 1200-1500 °C) характерен парагенезис муллита + кварц, кристобалит, тридимит (породы нередко стекловатые, со следами плавления и течения); более низкотемпературная зона (температура образования от ~800-900 °C до ~1200-1500 °C) выделяется парагенезисом кордиерит + кварц + тридимит + муллит (псевдомуллит); для самой низкотемпературной зоны характерен парагенезис муллита + кварц (в слабо переработанных породах нередко сохраняются реликтовые структурно-текстурные признаки). Для неизменных пород характерны мусковит и гидрослюда, хлорит, кварц, полевые шпаты; в некоторых образцах присутствуют накрит, иногда доломит или сидерит. В неизменных породах отсутствуют значимые структурные и минеральные пирометаморфические преобразования, что связано с высокой степенью катагенетических преобразований. В поверхностных и приповерхностных частях терриконов присутствуют фумарольные образования (сульфатные коры гипсового и магнезий-алюмо-аммониевого типов) и «чёрные блоки» с асфальтоподобной корой (высокоуглеродистые породы с безводными сульфатами магния, алюминия, аммония и калия, нашатырем, серой), обязанные своим происхождением пневматолитовым процессам.

Ключевые слова: террикон, горелые породы, техногенное месторождение, пирометаморфизм, муллит.

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ЮНЦ РАН, № госрегистрации 125011700412-6.

Для цитирования: Артемов И.А. Минералого-петрографическая зональность горелых горных отвалов угольных шахт (Восточный Донбасс). *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 155-165. DOI: 10.46698/VNC.2025.14.75.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.14.75.001

Original paper

Mineralogical and petrographic zoning of rocks of burning waste heaps of the Eastern Donbass

I.A. Artemov

Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Ave.,
Rostov-on-Don 344006, Russian Federation, e-mail: artemovia@gmail.com

Received: 29.04.2025, revised: 29.05.2025, accepted: 02.06.2025

Abstract. Relevance. Coal mining waste has been identified as a promising secondary raw material; however, its utilization is largely constrained by the diversity and variability of mineral composition present within the volume of rock dumps. **Aim.** The aim of the work is to determine the mineralogical and petrographic zonality in the waste rock dumps from the coal mines of the Eastern Donbass. **Materials and Methods.** The study of the material composition was carried out by the methods of electron-probe studies and X-ray phase analysis. **Results.** The present paper sets out the findings of a study into the mineralogical and petrological characteristics of the burnt rocks present within the slag heaps of Eastern Donbass. These rocks are of a sandy-clay lithological type. About 25% of the waste dumps burn due to exothermic destruction of sulphides with release of sulphur and oxidation of coal particles. Significant part of them is burnt out, which leads to transformations in the mineral composition of rocks, contributing to the removal of some harmful components (sulphides, etc.), increasing the homogeneity of the petrographic composition and physical properties of rocks, as well as the appearance of a number of new properties. Among pyrometamorphic rocks, zones with characteristic mineral associations are distinguished as they move away from the burning core. The high-temperature inner zone (temperature above 1200–1500 °C) is characterized by the paragenesis of mullite + quartz, cristobalite, tridymite (rocks are often glassy, with traces of melting and flow). The lower-temperature zone (formation temperature from ~800–900 °C to ~1200–1500 °C) is characterized by the paragenesis of cordierite + quartz + tridymite + mullite (pseudomullite); the lowest-temperature zone is characterized by the paragenesis of mullite + quartz (relict structural and textural features are often preserved in poorly processed rocks). The unaltered rocks are distinguished by the presence of muscovite and hydrous mica, chlorite, quartz, and feldspar. In certain samples, nacrite, and occasionally dolomite or siderite, are also present. The absence of significant structural and mineral pyrometamorphic transformations in the unaltered rocks is attributed to a high degree of catagenetic transformation. In the surface and near-surface parts of heaps, fumarole formations (sulfate crusts of gypsum and magnesium-aluminum-ammonium types) and “black blocks” with asphalt-like crust (high-carbonaceous rocks with anhydrous magnesium, aluminum, ammonium and potassium sulfates, ammonium and sulfur) are present. These owe their origin to pneumatolitic processes.

Keywords: waste heap, burned rocks, technogenic deposit, pyrometamorphism, mullite.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of realization of the state assignment of SSC RAS, state registration No. 125011700412-6.

For citation: Artemov I.A. Mineralogical and petrographic zoning of rocks of burning waste heaps of the Eastern Donbass. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 155–165. DOI: 10.46698/VNC.2025.14.75.001

Введение

Отходы угледобычи эффективно используются в металлургии, сельском хозяйстве, при производстве строительных материалов, керамики и в других отраслях промышленности [Yavruyan, Kotlyar, 2024]. Их применение позволяет значительно снизить сырьевые затраты для местных производителей, однако, в России менее 5% от общего объема образующихся углеотходов вовлекается во вторичную перера-

ботку [Шпирт и др., 2019; Буравчук, Гурьянова, 2015]. В немалой мере это связано со сложностью комплексной переработки плохосортированного полиминерального сырья [Кизильштейн и др., 1995]. Порядка 25% отвалов горит за счет экзотермической деструкции сульфидов с выделением серы и окисления частиц угля, и значительная часть является перегоревшей, что приводит к трансформациям минерального состава пород, способствующим удалению части вредных компонентов (сульфиды и пр.), повышению однородности петрографического состава и физических свойств пород, а также появлению ряда новых свойств. В силу различий литологического состава породной массы актуально изучение состава горелых пород разных угольных бассейнов и представленных в них литологических типов. **Цель работы** – определить минералого-петрографическую зональность горелых горных отвалов угольных шахт Восточного Донбасса. Основными задачами исследования являются изучение закономерностей пирометаморфических преобразований, состава минеральных ассоциаций и создаваемой ими минералого-петрографической зональности в породной массе. Актуальность определяется необходимостью повысить эффективность разработки технологических схем использования горелых пород, в первую очередь как сырья для керамической промышленности (отошители и интенсификаторы спекания в керамике и пр.). В работе приводится описание преобразований минералого-петрографического состава горелых пород терриконов Восточного Донбасса песчано-глинистого литологического типа.

Материал и методы

Материалом для исследования послужили образцы аргиллитов породного отвала шахты «Краснодонецкая» и №17 «Синегорская» Краснодонецкого шахтоуправления, отобранные в районе пос. Углекаменный. Шахтоуправление разрабатывало антрацитовый пласт m_8^1 на глубине 410-595 м средней мощностью до 1,7 м, разделенный прослойками аргиллитов (до 0,25 м). Образцы горелых пород и фумарольных образований были отобраны из терриконов трех шахт Восточного Донбасса с однотипным литологическим составом, в которых обнажены разные участки горелых пород активной зоны. Шахта им. Пролетарской Диктатуры расположена в г. Шахты. Отсыпка её породного отвала началась после 1923 г. и закончилась в 1972-1974 годах. Отрабатывались пласты k_5^0 Безымянный и k_5^H Нижне-Грушевский со средней мощностью 0,71 м и углами падения 3-8°. Максимальная глубина разработки 448 м. Террикон шахты им. Артёма также расположен в г. Шахты; эксплуатировался с 1911 по 1995 г. Шахта на глубине 700-750 м разрабатывала два угольных пласта: k_1^5 Рыхлый мощностью 0,5-0,6 м и с углом падения 16-20° и пласт $k_в^5$ Грушевский мощностью 0,8-0,9 м с углом падения 6-8°. Террикон шахты № 62 находится в с. Прохоровка; эксплуатировался с 1920-х годов по 1994 г. [Артемов и др., 2022].

Изучение вещественного состава проведено методами растровой электронной микроскопии, электронно-зондового микроанализа (полированные напыленные углеродом препараты изучались на микроскопе Tescan VEGA II LMU с системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT) и рентгенофазового анализа (порошковые препараты анализировались на дифрактометре «ARLX'TRA» с излучением $CuK\alpha 1,5406 \text{ \AA}$, $CuK\alpha 2,15444 \text{ \AA}$, и на дифрактометре «ДРОН-7»), результаты которых дополняют ранее проведенные исследования углеотвалов Ростовской области.

Результаты и обсуждение

Горючим материалом для терриконов является разложение сульфидных минералов и уголь в виде мелочи, кусков и прослоев в углесодержащих породах. Сначала происходит самонагревание дисперсного твёрдого материала, затем тепловое самовозгорание, тление вплоть до пламенного горения, которое начинается в зоне максимальных температур, а после распространяется на соседние объёмы террикона. Причиной самовозгорания породных отвалов был назван такой фактор, как способность вещества адсорбировать кислород, вступающий в химическое взаимодействие с угольным веществом. Также немаловажную роль играет разложение сульфидных минералов (пирита, марказита) содержащихся в породах, слагающих террикон, на железо и элементарную серу. Этому способствуют присутствующие в поверхностной зоне свободного водообмена тионовые бактерии, которые вызывают деструкцию сульфидов с выделением тепла [Чесноков, Щербакова, 1991; Щербакова, 2018; Gogola et al., 2020; Matysek, Jirasek, 2022].

В общем виде в строении террикона визуально (по внешним признакам) выделяются 4 зоны (рис. 1).

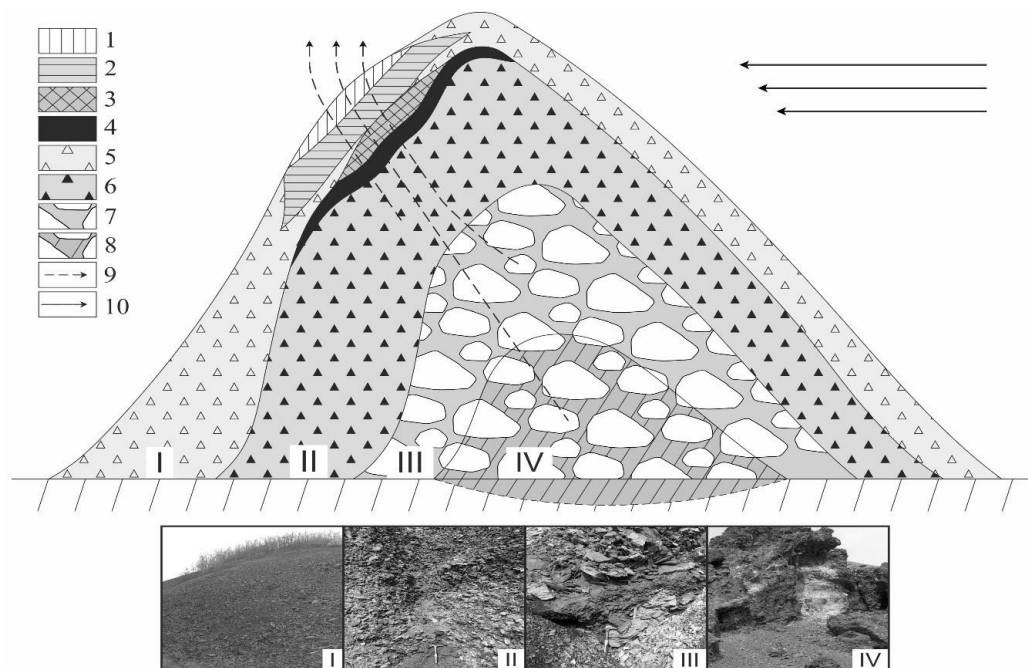


Рис. 1. Идеализированная схема строения горящего породного отвала: 1 – фумарольные коры гипсового состава; 2 – фумарольные коры магний-алюмо-аммониевого типа; 3 – асфальтоподобная кора; 4 – «черный блок»; 5 – осыпи негорелых пород (I); 6 – породы первой (низкотемпературной) зоны (II); 7 – породы второй (среднетемпературной) зоны (III); 8 – породы третьей (высокотемпературной) зоны (IV); 9 – направление движения парогазового потока; 10 – направление преобладающих ветров /

Fig. 1. The schematic representation of the structure of the burning rock dump. 1 – fumarole crust of gypsum composition; 2 – fumarole crust of magnesium-aluminum-ammonium type; 3 – asphalt-like crust; 4 – “black block”; 5 – unaltered rocks (I); 6 – rocks of the first (low-temperature) zone (II); 7 – rocks of the second (medium-temperature) zone (III); 8 – rocks of the third (high-temperature) zone (IV); 9 – direction of vapor-gas flow; 10 – direction of prevailing winds

На поверхности террикона выделяются зоны выветривания, зоны фумарольных образований и «чёрных блоков» с асфальтоподобной корой. Активная зона распо-

лагается внутри террикона и подразделяется по уровню пирометаморфических преобразований пород. Минералого-петрографический состав метاپород терриконов определяется изменением условий, контролируемых генерируемыми в очаге горения температурой и флюидным потоком, а также составом протолита. На внутреннее строение террикона влияет множество факторов. Во-первых, разные формы породного отвала (конический, хребтовой или плоский) по-своему аккумулируют тепло и подвергаются воздействию природных факторов. Во-вторых, литологический и гранулометрический состав непосредственно влияет на структуру террикона (в разное время отвал отсыпается разными по своим свойствам породами). В-третьих, количество угольного и сульфидного материала в породе определяет интенсивность нагрева. В-четвертых, количество доступного кислорода и воды, которые ускоряют окисление угля и сульфидных минералов. В процессе обжига исходный материал претерпевает ряд фазовых преобразований. Главными среди них являются следующие: дегидратация слоистых силикатов, аморфизация исходного субстрата, плавление продуктов аморфизации глинистых минералов, кристаллизация новых минеральных фаз [Сокол и др., 2001; Чесноков, Щербакова, 1991; Щербакова, 2018; Воробьев и др., 2016].

Фумарольные образования (названы так из-за сходства с вулканическими фумаролами) представляют собой белые и желтые пористые хрупкие агрегаты с явным трубчатым строением (рис. 2). Приурочены к окислительно-восстановительному геохимическому барьеру на поверхности отвала, образуют сульфатные коры магний-алюмо-аммониевого и гипсового минеральных типов [Артемов, Попов, 2020]. Первый тип имеет разнообразный минеральный состав – сложен сульфатами алюминия, магния, кальция, аммония и их кристаллогидратами (ведущие минералы – гипс, эпсомит, буссенготит, годовиковит, алюминит, чермигит, масканьит, тонкодисперсный кварц и углеродная сажа), и обладает в разной мере выраженным зональным строением, определяемым приуроченностью водных сульфатов к верхней зоне и безводных сульфатов – к нижней. Второй тип сложен преимущественно гипсом и самородной серой (сульфаты присутствуют в малых количествах).

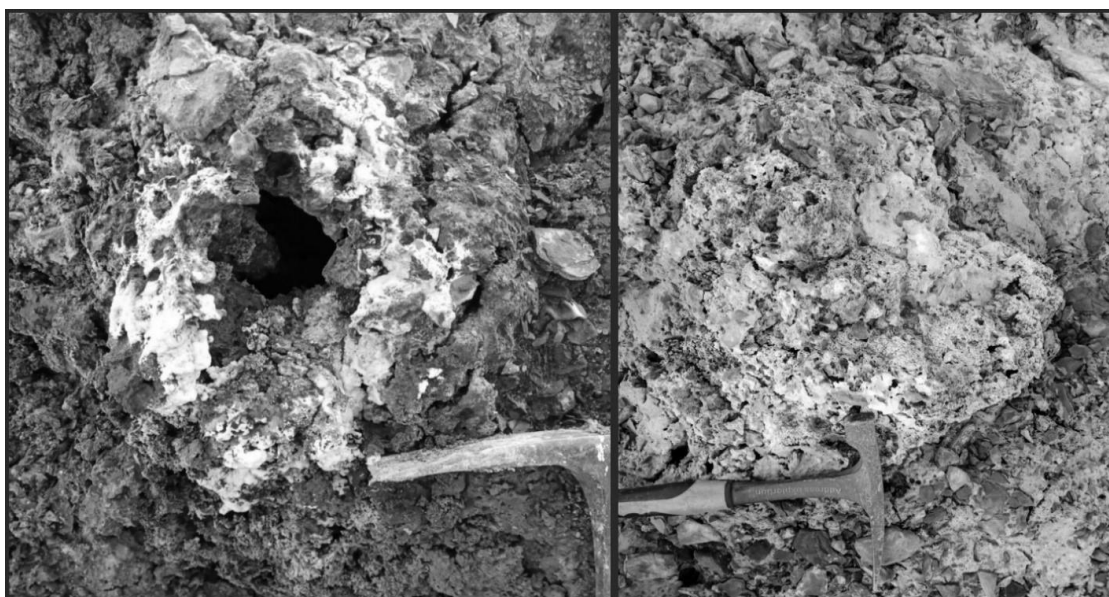


Рис. 2. Фумарольные образования на поверхности террикона /

Fig. 2. Fumarole formations on the waste heap surface

Асфальтоподобные коры образованы черными, кавернозными, прочными агрегатами, в целом имеющими сходный состав с поверхностными фумарольными отложениями, в них преобладают безводные сульфаты магния, алюминия, аммония и калия (эпсомит, масканьит, чермигит), нашатырь, сера.

Рассмотренный комплекс пород (фумарольные и асфальтоподобные коры) образован в ходе пневматолитового переноса и отложения продуктов сернокислотного с участием аммиака разложения алюмосиликатных пород терриконов и поступивших из нижележащей зоны «черных блоков» продуктов битумов и углей [Чесноков, Щербакова, 1991; Щербакова, 2018; Akulov, Akulova, 2020].

«Черные блоки» представлены черными (за счет насыщенности углеродистым веществом) массивными плотными агрегатами, сложенными преимущественно слабоокристаллизованным муллитом с кварцем, кристобалитом, силлиманитом. В изученных терриконах эти образования маломощные и представлены фрагментарно, что объясняется низким содержанием глинистых компонентов (их формирование связано с переработкой глинистых углесодержащих пород в условиях сильно ограниченного доступа кислорода для горения [Портола и др., 2020; Akulov, Akulova, 2020]). Флюидогенно-преобразованные высокоуглеродистые породы образуются при температурах до 500 °С на путях движения флюидов [Гамов и др., 2016] и залегают среди продуктов глубокого обжига, обрамляющих очаг активного горения.

Внешняя зона террикона сложена неизмененными породами. На дифрактограммах аргиллитов этой зоны (нефракционированные пробы) присутствуют рефлексы мусковита и гидрослюд, хлорита, в некоторых пробах – накрита (политипная модификация каолинита, возникающая при $T > 200^\circ\text{C}$); постоянно присутствуют кварц и полевые шпаты, иногда доломит или сидерит (Обр. № 1, 3, 5, 9, 10 на рис. 3). Породы преимущественно имеют чешуйчатую текстуру, частицы и агрегаты глинистых минералов хорошо выражены и не имеют четкой ориентировки, наблюдается большое количество угловатых межчастичных и межмикроагрегатных пор различной формы [Осипов и др., 1989; Котельников, Конюхов, 1986]. В таких аргиллитах наблюдается отсутствие видимых структурных и минеральных пирометаморфических преобразований и однородность их состава и строения до температур дегидроксилирования иллитов и железистых хлоритов и последующей кристаллизации псевдомуллита и муллита. Это связано с их высокой степенью катагенетических преобразований: анализ карт метаморфизма углей Донбасса показывает, что на рассматриваемой территории на уровне эксплуатируемых угольных пластов метаморфизм соответствует подстадии апокатагенеза, происходящего при температурах до 300–350 °С [Недоливко, 2005].

Среди пород, затронутых термальной переработкой, по результатам минералого-петрографических исследований, можно выделить 3 зоны, различающиеся минеральными парагенезисами. Породы первой, низкотемпературной зоны отличаются от неизмененных пород специфической микроструктурой: в них отдельные частицы глинистых минералов плохо различимы или совсем неразличимы, агрегаты имеют сглаженную форму и сливаются в монолитную структуру, а поровые пространства принимают округлые и вытянутые (щелевидные) формы [Осипов и др., 1989]. Для них характерна муллит-кварцевая минеральная ассоциация (Обр. № 7, 12 на рис. 3).

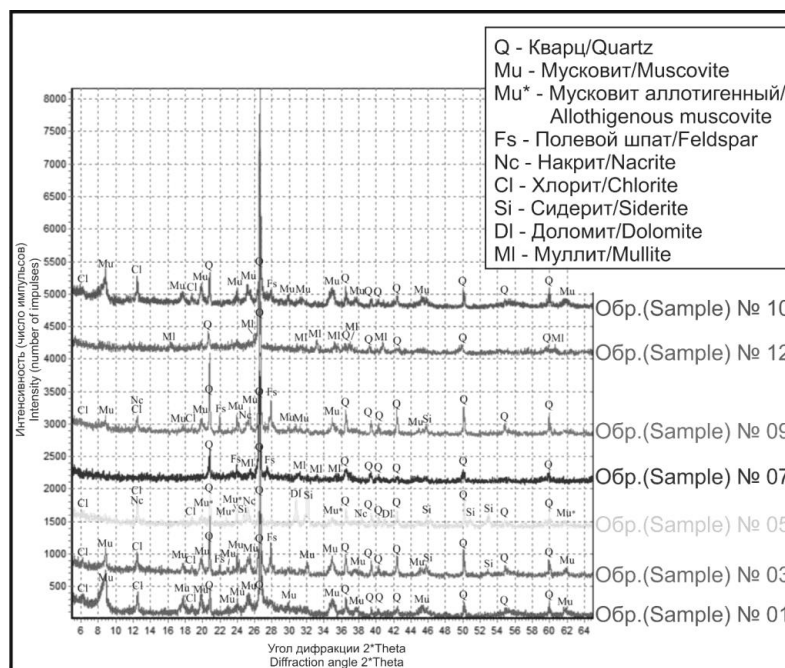


Рис. 3. Дифрактограммы термически неизменных пород (обр. 1, 3, 5, 9, 10) и пород первой минералого-петрографической зоны (обр. 7, 12) /

Fig. 3. Diffractograms of thermally unaltered rocks (samples 1, 3, 5, 9, 10) and rocks of the first mineralogical-petrographic zone (samples 7, 12)

Ранний муллит способен возникнуть сразу после прохождения эндоминимума ($T > 650^{\circ}\text{C}$) и формирования комплексов -O-Al[4]-O- внутри метакаолиновых доменов. В них происходит зародышеобразование игл муллита, а их рост осуществляется путем диффузии Si и Al в аморфизованной матрице. Здесь осуществляется термическая диссоциация минералов: разложение кристаллогидратов, дегидратация, распад гидросиликатов, а также окисление органических примесей. Исходный материал переходит в разряд псевдоаморфных веществ, продукты обжига находятся в состоянии высокой дисперсности, высокой пористости и минимальной механической прочности и обладают высокой химической активностью [Сокол и др., 2001; Rakhimova et al., 2023; Ribeiro et al., 2022].

Для пород второй зоны характерна кордиерит-кварц-тридимит-муллитовая (псевдомуллитовая) со шпинелью, гематитом, кристобалитом, герцинитом, оливином ассоциация (Обр. № Т-2 на рис. 4). Оценка температурных условий образования этой минеральной ассоциации определяется исходя из температуры образования муллита из метаклиновых минералов, которая составляет $\sim 900\text{--}1000^{\circ}\text{C}$, его образованию предшествует появление псевдомуллита (при $\sim 800^{\circ}\text{C}$), также в составе пород этой зоны появляется тридимит, что определяет нижний температурный рубеж данной зоны близкий к $800\text{--}900^{\circ}\text{C}$ (Абдрахимов В.З., Колпаков А.В., Денисов Д.Ю. Кристаллизация муллита при синтезе керамических материалов из отходов производств // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2013. Т. 3. С. 2716–2720. URL: <http://e-koncept.ru/2013/53546.htm> (дата обращения: 10.03.2025)). Здесь превращения преимущественно протекают в твердом состоянии, а основными процессами следует признать спекание и рекристаллизацию, которые сопровождаются продолжающейся термической диссоциацией, синтезом новых химических соединений, полиморфными переходами и образованием первых порций пленочного рас-

плава. Полнокристаллическая структура природного сырья через промежуточное псевдоаморфное состояние переходит во вторичную кристаллическую структуру.

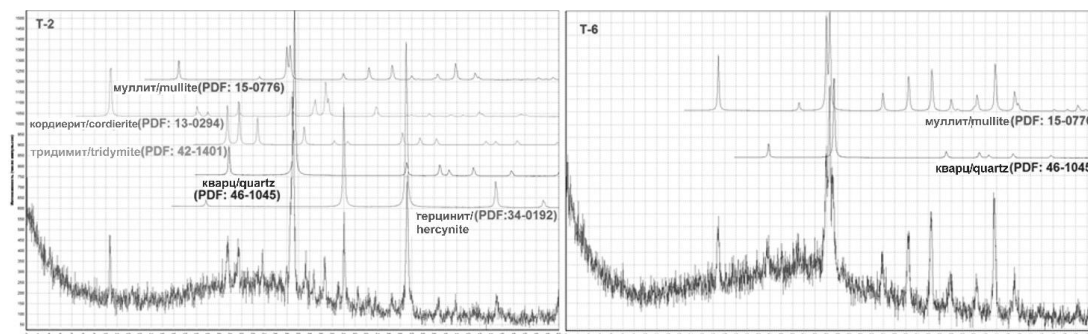


Рис. 4. Характерные дифрактограммы образцов второй (Т-2; метааргиллит) и третьей (Т-6; массивная микрокристаллическая порода) минералого-петрографических групп пород терриконов. Приведены дифрактограммы идентифицированных фаз из базы PDF-2 (в скобках указаны номера карточек) /

Fig. 4. Diffractograms of samples from the second (T-2; metaargillite) and third (T-6; massive microcrystalline rock) zones of the spoil heaps (PDF-2 database data was used)

Для пород третьей, высокотемпературной, зоны характерным является ассоциирующий с аморфной фазой парагенезис – муллит + кварц, кристобалит, тридимит, реже отмечаются санидин и микрофазы железистого оливина, кордиерита, шпинели, гематита, магнетита (Обр. № Т-6 на рис. 4). Наблюдаемая на дифрактограммах однородность состава позволяет предполагать развитие процессов полной муллитизации кордиерита и других минералов, протекающих при температурах выше 1200-1500°C [Гамов и др., 2016]. Здесь интенсифицируются и завершаются твердофазные преобразования и начинается плавление. Резко усиливаются диффузионные процессы, возрастает реакционная способность веществ, увеличивается скорость фазовых превращений, происходит термическое разрушение структур новообразованных неорганических соединений.

Выводы

Приведённые результаты исследований характеризуют термическую переработку глинистых пород в горелых породах терриконов песчано-глинистого литологического типа, характерных для восточной части Донецкого бассейна. На начальных стадиях термических преобразований происходит частичная аморфизация метаглинистого субстрата. Минералообразование преимущественно осуществляется путем синтеза из аморфизованного субстрата. Во внутренних зонах процессы рекристаллизации и стеклообразования приводят к повышению однородности минеральных составов и появлению микрокристаллических фаз.

Среди пирометаморфических пород по мере удаления от горящего ядра выделяются зоны с характерными минеральными ассоциациями: для высокотемпературной внутренней зоны (температура выше 1200-1500°C) характерен парагенезис муллит + кварц, кристобалит, тридимит (породы нередко стекловатые, со следами плавления и течения); более низкотемпературная зона (температура образования от ~800-900°C до ~1200-1500°C) выделяется парагенезисом кордиерит + кварц + тридимит + муллит (псевдомуллит); для самой низкотемпературной зоны (температура ниже ~800-900°C) характерен парагенезис муллит + кварц (в слабо переработанных

породах нередко сохраняются реликтовые структурно-текстурные признаки). Для неизмененных пород характерны мусковит и гидрослюда, хлорит, кварц, полевые шпаты; в некоторых образцах присутствуют накрит, иногда доломит или сидерит. В термически неизмененных породах отсутствуют значимые структурные и минеральные пирометаморфические трансформации, что связано с высокой степенью катагенетических преобразований угленосной толщи. В поверхностных и приповерхностных частях терриконов присутствуют фумарольные образования (сульфатные коры гипсового и магний-алюмо-аммониевого типов) и «чёрные блоки» с асфальтоподобной корой (высокоуглеродистые породы с безводными сульфатами магния, алюминия, аммония и калия, нашатырем, серой), обязанные своим происхождением процессам, подобным пневматолитовому.

Полученные результаты представляют интерес при проектировании рациональных схем отработки и индустриального использования пирометаморфически преобразованных пород терриконов или целенаправленного отжига пород терриконов для достижения желаемых свойств.

Литература

1. Артемов И.А., Попов Ю.В., Шарова Т.В. Минералого-петрографическая зональность пород горящих терриконов песчано-глинистого состава Восточного Донбасса. // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 11. – С. 107–112.
2. Артемов И.А., Попов Ю.В. Минералы фумарольных образований горящего терриконика шахты «им. Пролетарской диктатуры» (г. Шахты). // Материалы 6-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса». Т. 6. Донецк: Изд. Донецкий национальный технический университет, 2020. – С. 10–12.
3. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. Использование техногенного сырья в производстве нерудных строительных материалов. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2015. – № 1(182). – С. 111–117.
4. Воробьев А.Е., Портнов В.С., Маусымбаева А.Д., Бекетова М.С. Изменение качества углепородной массы в терриконах. // Труды университета. – 2016. – № 3(64). – С. 61–65.
5. Гамов М.И., Рылов В.Г., Мещанинов Ф.В., Наставкин А.В. Термобарогеохимическое моделирование процессов преобразования породных отвалов угольных шахт Восточного Донбасса. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 11. – С. 158–168.
6. Кизильштейн Л.Я., Дубов И.В., Шпицглюз А.Л., Парада С.Г. Компоненты зол и шлаков ТЭС. М.: Энергоатомиздат, 1995. – 176 с.
7. Котельников Д.Д., Конюхов А.И. Глинистые минералы осадочных пород. М.: Недра, 1986. – 247 с.
8. Недоливко Н.М. Геохимия: учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2005. – 102 с.
9. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород. / Под редакцией Академика Е.М. Сергеева. – М.: Недра, 1989. – 211 с.
10. Портола В.А., Протасов С.И., Бобровникова А.А., Серегин Е.А. Оценка длительности инкубационного периода самовозгорания углесодержащих пород отвалов. // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2020. – № 4. – С. 36–41.
11. Сокол Э.В., Ларина И.А., Максимова Н.В. Фазовые преобразования пелитов в процессах пирогенеза (на примере горельников Челябинского угольного бассейна). // Минералогия техногенеза. – 2001. – Т. 2. – С. 193–212.
12. Чесноков Б.В., Щербакова Е.П. Минералогия горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (опыт минералогии техногенеза). М.: Наука, 1991. – 152 с.

13. Шпирт М.Я., Горлов Е.Г., Шумовский А.В. Концепция технологического комплекса переработки отходов добычи и обогащения углей с получением широкого спектра товарной продукции. // *Химия твердого топлива*. – 2019. – № 6. – С. 35–40.
14. Щербакова Е.П. Краткий очерк минералогии горелых угольных отвалов. // *Уральский геологический журнал*. – 2018. – № 4(124). С. 14–29.
15. Akulov N., Akulova V. Pyrolysis of technogenic-redeposited coal-bearing rocks of spoil heaps. // *Geosciences*. – 2020. – Vol. 10. Issue 4. Art. No. 122. – 12 p. DOI: 10.3390/geosciences10040122.
16. Gogola K., Rogala T., Magdziarczyk M., Smolinski A. The mechanisms of endogenous fires occurring in extractive waste dumping facilities. // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12. Issue 7. Art. No. 2856. – 14 p. DOI: 10.3390/su12072856.
17. Matysek D., Jirasek J. Mineralogy of the coal waste dumps from the Czech part of the Upper Silesian Basin: Emphasized role of halides for element mobility. // *International Journal of Coal Geology*. – 2022. – Vol. 264. No. 1. Art. No. 104138. DOI: 10.1016/j.coal.2022.104138.
18. Rakhimova G., Stolboushkin A., Vyshar O., Stanevich V., Rakhimov M., Kozlov P. Strong structure formation of ceramic composites based on coal mining overburden rocks. // *Journal of Composites Science*. – 2023. – Vol. 7. Issue 5. Art. No. 209. – 21 p. DOI: 10.3390/jcs7050209.
19. Ribeiro J., Suarez-Ruiz I., Flores D. Coal related fires in Portugal: New occurrences and new insights on the characterization of thermally affected and non-affected coal waste piles. // *International Journal of Coal Geology*. – 2022. – Vol. 252. Issue 5. Art. No. 103941. DOI: 10.1016/j.coal.2022.103941.
20. Yavruyan K., Kotlyar V. Estimation of chemical and mineral composition, structural features, and pre-firing technological properties of waste coal heaps for ceramic production. // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14. Issue 7. Art. No. 1905. – 12 p. DOI: 10.3390/buildings14071905.

References

1. Artemov I.A., Popov Yu.V., Sharova T.V. Mineralogical and petrographic zoning of rocks of burning sandy-argillaceous waste heaps of the Eastern Donbass. *Advances in modern natural science*. 2022. No. 11. pp. 107–112. (In Russ)
2. Artemov I.A., Popov Yu.V. Minerals from fumarolic formations of the burning terrikon of the Proletarskaya Diktatura mine (Shakhty). In: *Proc. of the 6th Int. Sci. and Pract. Conf. "Innovative Prospects of Donbas."* Vol. 6. Donetsk. Donetsk National Technical University. 2020. pp. 10–12. (In Russ)
3. Buravchuk N.I., Guryanova O.V. The use of technogenic materials in the manufacture of non-metallic building materials. In: *Proceedings of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical science*. 2015. No. 1(182). pp. 111–117. (In Russ)
4. Vorobyov A.E., Portnov B.C., Mausymbaeva A.D., Beketova M.S. Changes in the quality of coal rock mass in spoil heaps. *University Proceedings*. 2016. No. 3(64). pp. 61–65. (In Russ)
5. Gamov M.I., Rylov V.G., Meshchaninov F.V., Nastavkin A.V. Thermobarogeochemical modeling of the transformation processes of rock dumps at coal mines in the Eastern Donbass. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2016. No. 11. pp. 158–168. (In Russ)
6. Kizilstein L.Ya., Dubov I.V., Shpitsgluz A.L., Parada S.G. Components of ash and slag from thermal power plants. Moscow. Energoatomizdat. 1995. 176 p. (In Russ)
7. Kotelnikov D.D., Konyukhov A.I. Clay minerals of sedimentary rocks. Moscow. Nedra. 1986. 247 p. (In Russ)
8. Nedolivko N.M. *Geochemistry: textbook*. Tomsk. TPU. 2005. 102 p. (In Russ)
9. Osipov V.I., Sokolov V.H., Rummyantseva N.A. Microstructure of clayey rocks. Ed. Academician E.M. Sergeev. Moscow. Nedra. 1989. 211 p. (In Russ)
10. Portola V.A., Protasov S.I., Bobrovnikova A.A., Seregin E.A. Assessment of the incubation period for spontaneous combustion of coal-containing waste rock. *Bulletin of the Scientific Center for Safety in the Coal Industry*. 2020. No. 4. pp. 36–41. (In Russ)

11. Sokol E.V., Larina I.A., Maksimova N.V. Phase transformations of pelites in pyrogenesis processes (based on the example of the Chelyabinsk coal basin). *Mineralogy of Technogenesis*. 2001. Vol. 2. pp. 193–212. (In Russ)
12. Chesnokov B.V., Shcherbakova E.P. *Mineralogy of burnt waste dumps in the Chelyabinsk coal basin (experience in technogenic mineralogy)*. Moscow. Nauka. 1991. 152 p. (In Russ)
13. Shpirt M.Ya., Gorlov E.G., Shumovsky A.V. Concept of a technological complex for processing coal mining and enrichment waste to obtain a wide range of commercial products. *Solid Fuel Chemistry*. 2019. No. 6. pp. 35–40. (In Russ)
14. Shcherbakova E.P. A brief overview of the mineralogy of burnt coal dumps. *Ural Geological Journal*. 2018. No. 4(124). pp. 14–29. (In Russ)
15. Akulov N., Akulova V. Pyrolysis of technogenic-redeposited coal-bearing rocks of spoil heaps. *Geosciences*. 2020. Vol. 10. Issue 4. Art. No. 122. 12 p. DOI: 10.3390/geosciences10040122.
16. Gogola K., Rogala T., Magdziarczyk M., Smolinski A. The mechanisms of endogenous fires occurring in extractive waste dumping facilities. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Issue 7. Art. No. 2856. 14 p. DOI: 10.3390/su12072856.
17. Matysek D., Jirasek J. Mineralogy of the coal waste dumps from the Czech part of the Upper Silesian Basin: Emphasized role of halides for element mobility. *International Journal of Coal Geology*. 2022. Vol. 264. No. 1. Art. No. 104138. DOI: 10.1016/j.coal.2022.104138.
18. Rakhimova G., Stolboushkin A., Vyshar O., Stanevich V., Rakhimov M., Kozlov P. Strong structure formation of ceramic composites based on coal mining overburden rocks. *Journal of Composites Science*. 2023. Vol. 7. Issue 5. Art. No. 209. 21 p. DOI: 10.3390/jcs7050209.
19. Ribeiro J., Suarez-Ruiz I., Flores D. Coal related fires in Portugal: New occurrences and new insights on the characterization of thermally affected and non-affected coal waste piles. *International Journal of Coal Geology*. 2022. Vol. 252. Issue 5. Art. No. 103941. DOI: 10.1016/j.coal.2022.103941.
20. Yavruyan K., Kotlyar V. Estimation of chemical and mineral composition, structural features, and pre-firing technological properties of waste coal heaps for ceramic production. *Buildings*. 2024. Vol. 14. Issue 7. Art. No. 1905. 12 p. DOI: 10.3390/buildings14071905.

УДК: 553.071:550.4

DOI: 10.46698/VNC.2025.48.48.001

Оригинальная статья

Геохимические особенности вмещающих пород золоторудных проявлений Восточного Донбасса

С.Г. Парада 

Южный научный центр Российской академии наук, Россия, 344006,
г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: segripa@rambler.ru

Статья поступила: 12.05.2025, доработана: 02.06.2025, принята к публикации: 06.06.2025

Резюме: Актуальность исследования определяется необходимостью оценки перспектив возможного расширения круга полезных компонентов руд золотоносных проявлений Восточного Донбасса. **Цель работы.** Изучить уровни концентрации золота, платины, палладия, родия и других рудных элементов в различных рудовмещающих породах, слагающих Керчикское и Трофимовское рудные поля. **Методы исследования.** Геологические маршруты с отбором проб рудных образований и вмещающих пород, анализ проб на золото, платину, палладий и другие рудные элементы атомно-адсорбционным и эмиссионно-спектральными методами. Анализ производственных отчетов и опубликованных работ. **Результаты исследования.** Установлено, что углистые алевролиты каменской свиты Керчикского рудного поля, содержащие сульфидную вкрапленность и конкреции, обладают повышенными содержаниями Au (0,02–1,02 г/т), Pt (0,1–0,2 г/т) и Pd (0,05–0,09 г/т). При этом концентрации этих элементов прямо коррелируются с содержанием сульфидов в породе. Также заметно повышенные концентрации в породах, содержащих сульфидную вкрапленность, отмечаются для Ag, As, Co, Ni, Cu, Mo, Pb, Zn и Y. Показано, что содержания элементов платиновой группы в породах каменской и алмазной свит Трофимовского рудного поля находятся ниже предела обнаружения этих элементов примененным методом анализа (<0,005 г/т). Выявленные содержания золота в различных породах рудного поля варьируют в пределах 0,0043–0,1 г/т, что в большинстве случаев выше кларковых значений. Установлено закономерное возрастание концентрации золота в пределах алевролит-аргиллитовой толщи каменской свиты в ряду песчаник – алевролит – аргиллит (от 0,0084 до 0,1 г/т), что может свидетельствовать о первичной (седиментогенно-диагенетической) природе обогащения этих пород золотом. Из других изученных элементов повышенные содержания в породах Трофимовской перспективной площади отмечаются для V, Cr и Pb. В ряду песчаник – аргиллит – углистый аргиллит – уголь концентрации Pb, Cu и Sr закономерно возрастают. Концентрирующая роль углистого вещества терригенных пород отмечается и в пределах Керчикского рудного поля для Pb, Ag, Mn, Nb и Y. Главной геохимической особенностью вмещающих терригенных пород Керчикского рудного поля является повышенная концентрация в них Pt и Pd, обусловленная, скорее всего, влиянием лампрофирового магматизма. Это является предпосылкой обнаружения рудных проявлений металлов платиновой группы. Территория Трофимовского рудного поля отличается монометалльной специализацией на золото стратиформного сульфидно-вкрапленного типа.

Ключевые слова: золото, платина, палладий, геохимия, углеродистые породы, рудопоявление, Восточный Донбасс.

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ЮНЦ РАН, № госрегистрации 125011700412-6.

Для цитирования: Парада С.Г. Геохимические особенности вмещающих пород золоторудных проявлений Восточного Донбасса. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2). С. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2025.48.48.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.48.48.001

Original paper

Geochemical features of the host rocks of the gold ore occurrences of the Eastern Donbass

S.G. Parada 

Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Ave.,
Rostov-on-Don 344006, Russian Federation, e-mail: segripa@rambler.ru

Received: 12.05.2025, revised: 02.06.2025, accepted: 06.06.2025

Abstract: The relevance of the study is determined by the need to assess the prospects for a possible expansion of the range of useful components of the ores of the gold-bearing occurrences of the Eastern Donbass. **Aim.** To study the concentration levels of gold, platinum, palladium, rhodium and other ore elements in various ore-bearing rocks composing the Kerchik and Trofimov ore fields. **Methods.** Geological routes with sampling of ore formations and host rocks, analysis of samples for gold, platinum, palladium and other ore elements by atomic adsorption and emission spectral methods. Analysis of production reports and published works. **Results.** It has been established that the carbonaceous siltstones of the Kamenskaya formation of the Kerch ore field, containing sulfide inclusions and nodules, have increased concentrations of Au (0.02–1.02 g/t), Pt (0.1–0.2 g/t) and Pd (0.05–0.09 g/t). At the same time, the concentrations of these elements are directly correlated with the content of sulfides in the rock. Also, markedly increased concentrations in rocks containing sulfide inclusions are noted for Ag, As, Co, Ni, Cu, Mo, Pb, Zn, and Y. It is shown that the concentrations of platinum group elements in the rocks of the Kamenskaya and diamond formations of the Trofimovsky ore field are below the detection limit of these elements by the applied analysis method (<0.005 g/t). The revealed gold content in various rocks of the ore field varies between 0.0043–0.1 g/t, which in most cases is higher than Clark values. A regular increase in gold concentration within the siltstone-mudstone strata of the Kamenskaya formation in the sandstone–siltstone–mudstone series (from 0.0084 to 0.1 g/t) has been established, which may indicate the primary (sedimentogenic-diagenetic) nature of the enrichment of these rocks with gold. Among other studied elements, increased concentrations in the rocks of the Trofimovskaya perspective area are noted for V, Cr, and Pb. In the sandstone–argillite–carbonaceous argillite–coal series, concentrations of Pb, Cu, and Sr increase naturally. The concentrating role of carbonaceous matter of terrigenous rocks is also noted within the Kerch ore field for Pb, Ag, Mn, Nb and Y. The main geochemical feature of the host terrigenous rocks of the Kerch ore field is the increased concentration of Pt and Pd in them due to the influence of lamprophyric magmatism. This is a prerequisite for the detection of ore manifestations of platinum group metals. The territory of the Trofimovsky ore field is distinguished by its monometallic specialization in gold of the stratiform sulfide-interspersed type.

Keywords: gold, platinum, palladium, geochemistry, carbonaceous rocks, ore occurrence, Eastern Donbass.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of realization of the state assignment of SSC RAS, state registration No. 125011700412-6.

For citation: Parada S.G. Geochemical features of the host rocks of the gold ore occurrences of the Eastern Donbass. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2025.48.48.001

Введение

Условия образования золоторудных месторождений в черносланцевых толщах и источники рудообразующих элементов в них по-прежнему остаются предметом споров. В начале XXI века было предложено такие месторождения называть орогенными [Goldfarb et al., 2001]. Термин «орогенные золоторудные месторождения» стал объединяющим понятием для определения группы месторождений и рудо-

проявлений золота, которые сформировались в сланцевых поясах на позднем этапе становления орогена при участии предположительно метаморфических или постмагматических флюидов различной глубинности. Геолого-генетические факторы формирования таких золоторудных месторождений рассмотрены в многочисленных работах отечественных и зарубежных исследователей [Савчук, Волков, 2019; Groves et al., 2020; Torvela et al., 2022; Volkov et al., 2024; Vikentyev, Bortnikov, 2024].

Анализ этих работ показывает, что так называемые орогенные месторождения золота, несмотря на относительное постоянство химического состава руд, формируются в широком диапазоне температур и давлений и в значительном интервале глубин земной коры. В работе [Goldfarb, Groves, 2015] показано, что большая часть представленных данных по изотопам не согласуется между месторождениями, что приводит к различным и довольно произвольным интерпретациям результатов определения источников флюидов и металлов для различных орогенных золотоносных провинций. Так, например, изотопный состав свинца в рудах Нежданнинского месторождения соответствует свинцу, заимствованному из вмещающих осадочных пород [Бортников и др., 2007], а рудообразующие флюиды обычно характеризуются значительными концентрациями метана и (или) азота. Также установлено наличие золоторудных проявлений в угленосных толщах [Seredin, 2004, 2007]. Так, в угольных пластах Павловского бурогоугольного месторождения (Приморский край), одного из самых крупных германий-угольных объектов, выявлены и описаны минералы Au, Pd и Pt. Все это в совокупности позволяет не исключать латераль-секреционный механизм происхождения некоторых золоторудных объектов в сланцевых толщах, в том числе в отношении выявленного в последние годы золотого оруденения в Восточном Донбассе.

В настоящей работе автор попытался проанализировать результаты определения содержаний золота и элементов платиновой группы в угленосных терригенных породах карбона, вмещающих золотоносные руды Керчикского и Трофимовского рудопроявлений. Первое из них тесно ассоциирует с магматическими породами ранне-среднеюрского несветаевского и позднеюрского керчикского интрузивного комплексов, второе – располагается в угленосных терригенных породах карбона при отсутствии магматизма.

Материал и методы

Материал для исследования получен при проведении полевых работ с участием автора в пределах Трофимовского потенциально рудного поля Северо-Кондаковской перспективной площади, в ходе которых осуществлены геологические маршруты с отбором проб рудных образований и вмещающих пород. Материалы по Керчикскому рудопроявлению получены в результате анализа фондовых материалов ООО «Южгеология» и опубликованных работ. Отбор проб осуществлялся из дубликатов кернов поисково-оценочных скважин колонкового бурения. Анализы проб на элементы платиновой группы выполнены в ЦНИГРИ (г. Москва) методом пробирной плавки с атомно-абсорбционным окончанием. Определение золота в породах Керчикского рудопроявления выполнено атомно-абсорбционным методом, определение остальных элементов-примесей выполнено эмиссионным спектральным анализом методом испарения в лаборатории ООО «Южгеология». Определение золота и элементов платиновой группы в породах Трофимовского рудопроявления выполнено в лаборатории ВИМСа (г. Москва) методом пробирной плавки с ICP MS окончанием.

Результаты и обсуждение

Керчикское рудопроявление является наиболее известным и относительно хорошо изученным золоторудным объектом в Восточном Донбассе. По сумме подсчитанных запасов и прогнозных ресурсов оно может соответствовать крупному месторождению. В работах [Лихачев и др., 1983; Княжев и др., 1987; Грановская, 1992; Зеленщиков и др., 2001 и др.] достаточно подробно охарактеризованы магматизм, вещественный состав руд и структурные условия их локализации. В настоящей статье приведены характеристика некоторых особенностей рудовмещающих углеродисто-терригенных пород и содержания в них золота и элементов платиновой группы.

В разрезе среднекаменноугольных отложений Керчикского рудопроявления, изученного по данным скважин картировочного и поискового бурения и представленного углеродистыми терригенными и терригенно-карбонатными отложениями каменной свиты, выявлена типичная для Восточного Донбасса толща аргиллит-алевролит-песчаных отложений, сформированных в условиях континентального, лагунного и прибрежно-морского осадконакопления [Лихачев и др., 1983]. Они содержат относительно высокие концентрации золота (в среднем 0,09 г/т) при положительных кларках концентрации меди, хрома, никеля и элементов платиновой группы (табл. 1, 2, 3), что оказалось свойственно породам наиболее изменчивого фациального состава. Это, прежде всего, сочетание углеродистых алевролитов и тонкозернистых песчаников, включающих послойные скопления и рассеянную вкрапленность тонко и мелкозернистого пирита, а также скопления его конкреционных форм. При этом сульфидное вещество составляет 1–5 % объема породы с заметным увеличением в отложениях, обогащенных песчанистой составляющей.

Таблица 1 / Table 1

**Содержания элементов платиновой группы (в г/т)
в сульфидизированных терригенных отложениях средней пачки каменной
свиты Керчикского рудного поля (пробы отобраны из пород,
вскрытых скважиной 1/35 в интервале 71–82 м) /**
**Contents of platinum group elements (in g/t) in sulfidized terrigenous deposits
of the middle pack of the Kamenskaya formation of the Kerchik ore field
(samples were taken from rocks excavated by well 1/35 in the range of 71–82 m)**

№ п/п/ No. p/p	Количество проб/ Number of samples	Pt	Pd	Rh
1	3	0,16–0,20	0,05–0,08	0,02
2	1	0,18	0,09	<0,02
3	1	0,10	0,05	<0,02

Примечание: 1 – углистые алевролиты с послойной сульфидизацией (конкреции, вкрапленность 5–7 % объема пород); 2 – углистые алевролиты и т/з песчаники с примесью «послойных» сульфидов не более 1–2 %; 3 – углистые алевролиты слабо сульфидизированные (сульфидная вкрапленность менее 1 % объема пород). /

Note: 1 – carbonaceous siltstones with layered sulfidization (nodules, inclusions of 5–7% of the rock volume); 2 – carbonaceous siltstones and t/w sandstones with an admixture of “layered” sulfides of no more than 1–2%; 3 – carbonaceous siltstones slightly sulfidized (sulfide inclusions of less than 1% of the rock volume).

Таблица 2 / Table 2

Содержания элементов платиновой группы (в г/т) в сульфидизированных терригенных отложениях верхней пачки каменской свиты Керчикского рудного поля (пробы отобраны из углистых алевролитов с послойной сульфидизацией, составляющей в среднем 1–3 % объема пород) /

Contents of platinum group elements (in g/t) in sulfidized terrigenous deposits of the upper pack of the Kamenskaya formation of the Kerchik ore field (samples were taken from carbonaceous siltstones with layered sulfidization, averaging 1-3% of the rock volume)

№ п/п/ No. p/p	Количество проб/ Number of samples	Pt	Pd	Rh
1	1	0,15	0,08	—
2	2	0,05, 0,03	0,04, 0,09	0,02
3	2	0,10, 0,02	0,02, 0,02	—

Примечание: 1 – скважина 2к/18, 2 – скважина 3к/18, 3 – скважина 3к/6. /

Note: 1 – well 2K/18, 2 – well 3k/18, 3 – well 3k/6.

Таким образом, терригенные отложения средней и верхней пачек каменской свиты Керчикского рудного поля содержат заметно повышенные (надкларковые) концентрации платины, палладия и родия, что, вероятнее всего, обусловлено наличием вулканогенного материала в составе терригенных пород, а также влиянием позднеюрского лампрофирового магматизма.

Таблица 3 / Table 3

Содержание элементов-примесей в терригенных отложениях средней пачки каменской свиты Керчикского рудного поля. Золото в г/т, остальные элементы в % (в числителе интервал содержаний элемента, в знаменателе среднее арифметическое) /

The content of impurity elements in the terrigenous sediments of the middle pack of the Kamenskaya formation of the Kerchik ore field. Gold in g/t, other elements in % (the numerator is the range of element contents, the denominator is the arithmetic mean)

Химические элементы/ Chemical elements	Песчаники мелкозернистые/ Fine-grained sandstones	Переслаивание алевролитов и мелкозернистых песчаников/ Interlacing of siltstones and fine-grained sandstones	Углистые алевролиты и аргиллиты/ Carbonaceous siltstones and mudstones	Алевролиты с послойной вкрапленностью и конкрециями пирита/ Siltstones with layered inclusions and nodules of pyrite
Au	0,004–0,03/ 0,012	0,002–0,01/ 0,007	0,002–0,005/ 0,003	0,02–1,02/ 0,09
Ag	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002
As	—	—	—	0,2
Ba	0,02	0,02	0,03	0,03

Be	<0,0001	0,0002	0,0001	0,0001
Bi	—	—	—	—
Cd	—	—	—	0,01
Co	<0,001	0,001	0,001	0,004
Cr	0,04	0,03	0,01	0,01
Cu	0,04	0,02	0,01	0,08
Ga	—	—	—	—
Ge	—	—	—	—
Mn	0,3	0,4	0,6	0,4
Mo	—	—	—	0,001
Nb	0,001	0,001	0,003	0,002
Ni	0,004	0,002	0,001	0,03
Pb	0,001	0,001	0,002	0,003
Sb	—	—	—	—
Sc	0,002	0,001	—	0,002
Sn	—	—	—	—
Sr	0,001	0,001	0,001	0,001
Ta	—	—	—	—
Ti	0,8	0,6	0,1	0,1
Tl	—	—	—	—
V	0,04	0,03	<0,001	0,004
W	—	—	—	—
Zn	—	0,01	<0,01	0,02
Zr	0,03	0,02	0,01	0,01
Y	0,001	0,001	0,004	0,006

Из таблицы 3 следует, что заметно повышенные концентрации золота и некоторых других рудообразующих элементов (Ag, As, Co, Ni, Cu, Mo, Pb, Zn, Y) обнаруживаются в породах, содержащих стратифицированную сульфидную вкрапленность и сульфидные конкреции.

Исследования золотонности и платиноносности углеродистых терригенных толщ в разных регионах показывают, что повышенные содержания золота и элементов платиновой группы связаны с присутствием в терригенном разрезе вулканогенных пород, а также могут быть обусловлены вторичными гидротермально-метасоматическими процессами [Горжевский и др., 1987]. Для золота в терригенных углеродсодержащих породах отмечается промежуточный уровень концентрации (от 0,08 до 1,0 г/т), связанный, главным образом, с тонкодисперсной вкрапленностью сульфидов [Ермолаев и др., 1999]. Именно такие надкларковые концентрации золота в породах могут являться источником для формирования промышленных руд при последующих процессах магматизма.

Изученные ранее геохимические характеристики терригенного комплекса Керчического рудопоявления [Черненко, Трощенко, 2012] могут свидетельствовать о генетическом единстве осадочного материала пород, поступлении его из одних и тех же источников в осадки, отлагавшиеся в различных фациальных обстановках. При этом, первоисточником осадочного вещества, обогащенного золотом, медью и др. элементами могли быть золотоносные и меденосные метаморфические комплексы рифейского возраста Ростовского выступа, интенсивное разрушение которых происходило в раннем–среднем карбоне со сносом продуктов разрушения в северо-восточном направлении.

Таким образом, наряду с прожилково-вкрапленной золоторудной минерализацией, связанной с гидротермальным процессом, в углеродисто-терригенных породах рудовмещающего комплекса отмечена стратифицированная вкрапленная и прожилково-вкрапленная золотосодержащая пиритовая минерализация. Пиритизированные тонкозернистые алевролиты нижней и средней пачек каменной свиты образуют невыдержанные по мощности слои изначально глинистых углеродистых отложений, включавших диагенетическую пиритовую минерализацию. Мощность отдельных сульфидизированных слоев и линз не превышает 0,5–1,0 м. Пирит тонко-мелкозернистый, нередко собран в послойные скопления и прожилки (рис. 1). В тонкозернистых агрегатах иногда сохраняются реликтовые конкреционные формы. Содержания золота в монофракциях пиритов достигают сотен г/т. В связи с чем, можно считать, что повышенная золотоносность этих терригенных пород обусловлена золотоносностью содержащегося в них пирита.

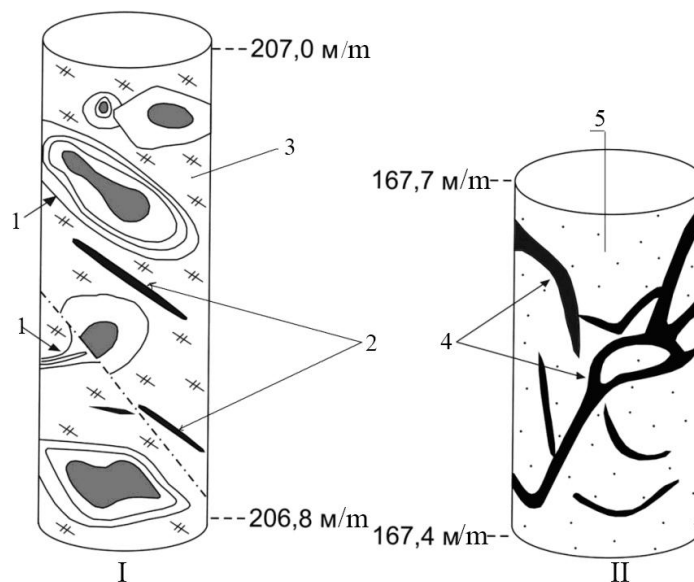


Рис. 1. Выделения прожилков густо вкрапленного пирита в рудовмещающих метасоматитах и песчаниках Керчического рудопоявления. Зарисовка кернов скважин:

I – скв. 101, II – скв. 94; 1 – сидеритовые конкреции, 2 – послойно-линзовидные прожилки пирита, 3 – метасоматит, 4 – секущие прожилки пирита, 5 – песчаник /

Fig. 1. Allocation of veins of densely interspersed pyrite in ore-bearing metasomatites and sandstones of the Kerch ore occurrence. Drawing of borehole cores: I – sq. 101, II – sq. 94;

1 – siderite nodules, 2 – layered lenticular veins of pyrite, 3 – metasomatite, 4 – secant veins of pyrite, 5 – sandstone

Повышенная золотоносность терригенных отложений, включающих стратифицированную сульфидную минерализацию, характерна для осадочных комплексов разных золотоносных регионов (Южного Верхоянья, Западного и Восточного Урала, Кызылкумского, Восточно-Казахстанского и др. регионов) и является результатом перераспределения вещества в условиях диагенеза, катагенеза и метаморфизма [Мирзеханов, Мирзеханова, 1991], и подтверждает известную точку зрения о важной роли сульфидного вещества, как концентратора металлов при осадконакоплении и диагенезе.

Изменчивость в распределении содержаний золота в контуре рудных тел может свидетельствовать о явлениях вторичного перераспределения золота в процессе метасоматической переработки рудовмещающих пород с последующим переотложением и локализацией в форме сложнопостроенных минерализованных зон.

Полученный результат позволяет предположить, что основная масса золота, заключенного в прожилково-вкрапленной кварц-полисульфидной минерализации крутопадающих зон, была привнесена гидротермальными растворами из источника, скорее всего включающего нижние горизонты каменной свиты, а также терригенные потенциально золотоносные отложения подстилающих толщ.

Таким образом, формирование золотого оруденения на Керчикском рудопроявлении является результатом сложного многостадийного процесса, включающего в себя: отложение золота в процессе осадконакопления, диагенеза, катагенеза, метасоматических преобразований и поздней гидротермальной деятельности, связанной с орогенным магматизмом юрского возраста. При этом рудные накопления каждого этапа, как это показано в работе [Кокин, 2005], подвергались переотложению с последовательным повышением концентраций золота при проявлении более поздних процессов.

Основные характеристики *Трофимовского золоторудного проявления*, особенности геологического строения одноименного рудного поля и Северо-Кондаковской перспективной площади в целом приведены в работах [Давыденко и др., 2014; Парада, 2024].

Рудовмещающий разрез представлен монотонной толщей переслаивающихся аргиллитов, алевролитов и песчаников с подчиненными слоями известняков и пластами углей. Между аргиллитами и алевролитами отмечаются частые фациальные переходы, что обусловлено, скорее всего, дельтовыми условиями осадконакопления.

Аргиллиты макроскопически представляют углистые породы от светло-серого до черного цвета, плотные, массивные, реже тонкоплитчатые. Структура микрозернисто-пелитовая или пелитовая. Основная масса аргиллитов сложена глинистым материалом, состав которого меняется от гидрослюдистого до гидрослюдисто-монтмориллонитового с примесью хлорита и серицита. Глинистое вещество пигментируется в разной степени углистым материалом, который присутствует в виде тонкораспыленной примеси углефицированного растительного детрита, частично пиритизированного. Более крупные фрагменты в виде тонких ветвистых форм беспорядочно распределены в породе. Встречается детрит органических остатков. Пирит (2–3%) встречается в виде линзочек, тонко рассеянной вкрапленности и пылевидных скоплений.

Алевролиты характеризуются от светло-серой до темно-серой окраской, мелкой волнистой, параллельной или линзовидной слоистостью. Структура алевритовая, алевро-псаммитовая. Микроскопические исследования породы показали, что она состоит из обломков кварца – до 40%, полевых шпатов – 2-4%, обломочков пород кремнистого состава – до 7%, чешуек слюд ~ 8% и цементирующей глиноподобной массы. Обломочный материал в породе распределен неравномерно. Форма обломков кварца и кремнистых пород угловатая, угловато-окатанная, размер колеблется от 0,026 до 0,11 мм. Полевошпатовые обломки имеют таблитчатую форму, частично серицитизированы. Чешуйки слюды представлены в основном мусковитом, часто изломаны, иногда хлоритизированы. В породе отмечается до 1% вкрапленного пирита. Цементирующая масса достигает 38% объема породы. Обломочный материал и слюды погружены в цемент сложного состава базального типа. В неизмененных разностях цемент имеет глинистый гидрослюдистый (чаще) или карбонатный (кальцитовый) состав.

Слои песчаников отличаются большей выдержанностью, как по простиранию, так и по мощности. Они представлены плотными, крепкими, массивными или слоистыми, часто плитчатыми разностями полевошпат-кварцевого или полимиктового составов. Структура пород – псаммитовая от мелкозернистой до крупнозернистой. Микроскопическое изучение показало, что порода состоит, в основном, из обломков кварца, полевого шпата. Обломки пород кремнистого, кремнисто-слюдистого состава и вулканического происхождения находятся в подчиненном количестве. Основной тип цементации – поровый или пленочно-поровый. Состав цемента смешанный: кварц-серицитовый, карбонатный, углистый, серицит-карбонат-глинистый, серицит-гетитовый. Содержание цемента достигает 10%. Пирит (1–2%) встречается в виде тонко рассеянной вкрапленности, пылевидных скоплений, и в виде небольших включений, в отдельных случаях содержание пиритизированной органики достигает 16%.

Известняки, встреченные на изучаемой площади, нами специально не изучались. Анализировались в отдельных случаях метасоматически измененные разности. Макроскопически они представляют собой темно-серые, плотные, массивные породы с неровным и раковистым изломом. Структура пород мелко-скрытокристаллическая, органогенная, детритовая.

Органическая составляющая, в отдельных случаях по объему достигающая 85% породы, представлена фрагментами известковых раковин фораминифер, остракод с обрывками водорослей, криноидей, мшанок. Обломочная часть представлена зернами кварца, глинистым веществом (гидрослюдисто-каолинитовым), чешуйками мусковита. Обломочная часть достигает 20%. Достаточно часто в известняках отмечаются микротрещины мощностью 2–3 мм, залеченные кристаллически-зернистым кальцитом, гидроокислами железа буро-красного цвета, углистым веществом. Цементирующая масса (~20%) кристаллически-зернистый кальцит.

В таблице 4 приведены средние значения фоновых содержаний химических элементов, которые в аргиллитах близки кларку глинистых пород. При этом для литофильных элементов фоновые содержания на 5–10% ниже кларковых, а для халькофильных (Pb, Cu, Zn) – на 10–20% выше кларковых, что, вероятно, связано с их поздним обогащением за счет проявления гидротермальных процессов. Этим

также объясняется повышение фоновых содержаний халькофильных элементов в углистых аргиллитах и углях за счет их повышенной сорбционной способности. Особенно это характерно для свинца, средние содержания которого в ряду: аргиллит – углистый аргиллит – уголь, закономерно увеличиваются от 24 до 100 г/т. При этом в аргиллитах пропорционально возрастает содержание серебра.

Таблица 4 / Table 4

Сравнительная характеристика фоновых содержаний химических элементов в углях и породах карбона Северо-Кондаковской площади (в г/т) /

Comparative characteristics of background concentrations of chemical elements in coals and carboniferous rocks of the Severo-Kondakovskaya area (in g/t)

Породы/ Rocks	Количество проб/ Number of samples	Ni	Co	Cr	V	Pb	Cu	Zn	Li	Sr
Угли/ Coals	24	50	28	200	120	100	60	60	35	300
Углистые аргиллиты/ Carbonaceous mudstones	48	80	30	160	140	46	53	180	58	280
Аргиллиты/ Mudstones	413	52	20	140	130	24	55	115	50	240
Песчаники/ Sandstones	326	40	17	200	83	15	27	67	36	215

В алевролитах и песчаниках по мере увеличения обломочной составляющей пород, среди которой преобладает кварц, закономерно уменьшается содержание почти всех изучаемых элементов. Судя по тому, что в углистых аргиллитах заметно выше содержания практически всех изученных химических элементов по сравнению с безуглеродистыми аргиллитами (за исключением меди), концентратом этих элементов в существенной доле является углистое вещество. В свою очередь, безуглеродистые аргиллиты обогащены большинством из изученных элементов (за исключением хрома и бария) по сравнению с песчаниками. Это свидетельствует о существенной роли глинистого вещества, помимо углеродистого вещества, в концентрации многих элементов на стадии седиментогенеза и диагенеза. При этом наиболее контрастно эта особенность отмечается для халькофильных элементов, фоновые содержания которых в аргиллитах в 2 раза выше, чем в песчаниках.

Результаты изучения золотоносности осадочных пород в пределах Трофимовского рудного поля (табл. 5) свидетельствуют о повышенных концентрациях золота в рассматриваемых породах.

Таблица 5 / Table 5

**Средние содержания золота и элементов платиновой группы (в г/т)
в потенциально продуктивных породах Трофимовского рудного поля
(цифры в скобках – количество проб) /**

**Average contents of gold and platinum group elements (in g/t)
in potentially productive rocks of the Trofimovsky ore field
(numbers in parentheses – number of samples)**

Пачка (свита)/ Pack (entourage)	Породы/ Rocks	Au	Pt	Pb	Rh
Песчаниковая (каменская)/ Sandstone (kamenskaya)	Песчаники/ sandstones (8)	0,0043	<0,005	<0,005	<0,002
	Алевролиты/ Siltstones (2)	0,0071	<0,005	<0,005	<0,002
	Аргиллиты/ Mudstones (3)	0,0062	<0,005	<0,005	<0,002
Алевролит-аргиллитовая (каменская)/ Siltstone-mudstone (kamenskaya)	Песчаники/ Sandstones (2)	0,0084	<0,005	<0,005	<0,002
	Алевролиты/ Siltstones (10)	0,017	<0,005	<0,005	<0,002
	Аргиллиты/ Mudstones (7)	0,10	<0,005	<0,005	<0,002
Песчано-алевролит-аргиллитовая (алмазная)/ Sandy-siltstone-argillite (diamond)	Песчаники/ Sandstones (3)	0,0055	<0,005	<0,005	<0,002
	Алевролиты/ Siltstones (7)	0,012	<0,005	<0,005	<0,002
	Аргиллиты/ Mudstones (8)	0,0093	<0,005	<0,005	<0,002

Особое на себя внимание обращает алевролит-аргиллитовая толща, в которой содержания золота возрастают в ряду песчаник – алевролит – аргиллит. Для существенно песчаниковой толщи каменской свиты и песчанико-алевролит-аргиллитовой толщи алмазной свиты такая закономерность не отмечается. Все это в совокупности может свидетельствовать о первичной (седиментогенно-диагенетической) природе обогащения золотом пород алевролит-аргиллитовой толщи каменской свиты за счет сорбции его глинистым и углеродистым веществом при осадконакоплении и диагенезе.

Таким образом, геохимические особенности рудовмещающих толщ Трофимовского рудопроявления соответствуют разработанной нами ранее седиментогенно-диагенетической модели формирования предрудных золотоносных минерализаций [Парада, 2004].

В соответствии с этой моделью алевролит-аргиллитовая пачка каменской свиты, содержащая слои и прослои пород, обогащенных различными формами осадочно-диагенетических сульфидов и обладающих концентрациями золота на 1–2 порядка выше относительно кларковых, определяет благоприятные условия для локализации золотого оруденения Восточного Донбасса осадочно-метаморфогенно-гидротермального (черносланцевого) генетического класса.

Заключение

Углистые алевролиты каменной свиты Керчикского рудного поля, содержащие сульфидную вкрапленность и конкреции, обладают повышенными концентрациями Au (0,02–1,02 г/т), Pt (0,1–0,2 г/т) и Pd (0,05–0,09 г/т). При этом содержания этих элементов прямо коррелируются с количеством сульфидов в породе. Также заметно повышенные концентрации в породах, содержащих сульфидную вкрапленность, отмечаются для Ag, As, Co, Ni, Cu, Mo, Pb, Zn и Y.

Содержания элементов платиновой группы в породах каменной и алмазной свит Трофимовского рудного поля находятся ниже предела обнаружения этих элементов примененным методом анализа ($<0,005$ г/т). Содержания золота в различных породах рудного поля варьируют в пределах 0,0043–0,1 г/т, что в большинстве случаев выше кларковых значений. При этом концентрации золота в пределах алевролит-аргиллитовой толщи каменной свиты возрастают в ряду песчаник – алевролит – аргиллит (от 0,0084 до 0,1 г/т), что может свидетельствовать о первичной (седиментогенно-диагенетической) природе обогащения этих пород золотом.

Из других изученных элементов повышенные содержания в породах Трофимовской перспективной площади отмечаются для V, Cr и Pb. Установлено, что в ряду песчаник – аргиллит – углистый аргиллит – уголь концентрации Pb, Cu и Sr закономерно возрастают. Концентрирующая роль углистого вещества терригенных пород отмечается и в пределах Керчикского рудного поля для Pb, Ag, Mn, Nb и Y.

Таким образом, территория Трофимовского рудного поля отличается монометалльной специализацией на золото стратиформного сульфидно-вкрапленного типа.

Главной геохимической особенностью вмещающих терригенных пород Керчикского рудного поля, определяющей его металлогеническую специфику, является повышенная концентрация Pt и Pd, что, скорее всего, связано с наличием лампрофирового магматизма. Это открывает перспективы обнаружения рудных проявлений металлов платиновой группы.

Литература

1. Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Викентьева О.В., Прокофьев В.Ю., Алпатов В.А., Бахарев А.Г. Состав и происхождение флюидов в гидротермальной системе Неждановского золоторудного месторождения, Саха-Якутия, Россия. // Геология рудных месторождений. – 2007. – Т. 49. № 2. – С. 99–45.
2. Горжевский Л.И., Зверева Е.А., Ганжа Г.В. Углеродсодержащие терригенные толщи и их золотоносность. М.: ВИЭМС, 1987. – 43 с.
3. Грановская Н.В. Минералогия и термобарогеохимия золота в Юго-Восточном Донбассе. // Записки всероссийского минералогического общества. – 1992. – Т. 121. № 4. – С. 29–42.
4. Давыденко Д.Б., Давыденко Е.Д., Исаев В.С., Клещенко А.В., Мохов А.В. Опыт выявления и изучения зон эндогенной флюидизации комплексом дистанционных и геохимических методов. // Вестник Южного научного центра РАН. – 2014. – Т. 10. № 1. – С. 25–34.
5. Ермолаев Н.П., Котина Р.П. Пашкова Е.А., Созинов Н.А. Механизмы концентрирования благородных металлов в терригенно-углеродистых отложениях. М.: Научный мир, 1999. – 124 с.
6. Зеленщиков Г.В., Курбанов Н.К., Кучеровский П.Г., Радаева Т.П. Перспективы золотоносности Припятско-Днепровско-Донецкого авлакогена. // Руды и металлы. – 2001. – № 2. – С. 26–35.

7. Княжев А.С., Терентенко Н.А., Лихачев В.А., Зеленщиков Г.В., Устиненко М.И. О последовательности минералообразования Керчикского рудопроявления. // Геологическое строение и полезные ископаемые Ростовской области. / Сборник статей Южного производственного геологического объединения. Ростов-на-Дону: Изд. РГУ, 1987. – С. 95–100.
8. Кокин А.В. Оценка перспективности рудных объектов (теория и практика). Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2005. – 384 с.
9. Лихачев В.А., Зеленщиков Г.В., Терентенко Н.А. Новое рудопроявление цветных и благородных металлов в Восточном Донбассе. // Геология и полезные ископаемые Нижнего Дона. / Сборник статей Южного производственного геологического объединения. Ростов-на-Дону: Изд. РГУ, 1983. – С. 9–13.
10. Мирзеханов Г.С., Мирзеханова З.Г. Стратифицированное золото-кварцевое оруденение углеродисто-терригенных толщ Южного Верхоянья. Владивосток: ДВО АН СССР, 1991. – 128 с.
11. Парада С.Г. Золоторудные проявления Восточного Донбасса. // Наука Юга России. – 2024. – Т. 20. № 4 – С. 33–38. DOI: 10.7868/S25000640240405.
12. Парада С.Г. Условия формирования и золотоносность черносланцевых комплексов Амура-Охотской складчатой области: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.11 / Парада Сергей Григорьевич. – Ростов-на-Дону: РГУ, 2004. – 48 с.
13. Савчук Ю.С., Волков А.В. Крупные и суперкрупные орогенные золотые месторождения: геодинамика, структура, генетические следствия. // Литосфера. – 2019. – Т. 19. № 6. – С. 813–833.
14. Черненко М.Ю., Трощенко В.В. Геохимическая специализация магматических и осадочных пород Керчикской рудовмещающей структуры (Восточный Донбасс). // Вестник Южного научного центра. – 2012. – Т. 8. № 4. – С. 50–57.
15. Goldfarb R.J., Groves D.I., Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. // *Ore Geology Reviews*. – 2001. – Vol. 18. – pp. 1–75.
16. Goldfarb R.J., Groves D.I. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. // *Lithos*. – 2015. – Vol. 233. – pp. 2–26.
17. Groves D.I., Santosh M., Deng J. et al. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration. // *Mineralium Deposita*. – 2020. – Vol. 55. – pp. 275–292.
18. Seredin V.V. Distribution and formation conditions of noble metal mineralization in coal-bearing basins. // *Geology of Ore Deposits*. – 2007. – Vol. 49. No. 1. – pp. 1–30.
19. Seredin V.V. The AU-PGE mineralization at The Pavlovsk brown coal deposit, Primorye. // *Geology of Ore Deposits*. – 2004. – Vol. 46. No. 1. – pp. 36–63.
20. Torvela T., Lambert-Smith J.S., Chapman R.J. Recent advances in understanding gold deposits: from Orogeny to Alluvium. London: Geological Society, 2022. – 440 p.
21. Vikentyev I.V., Bortnikov N.S. Gold deposits of Central and North Asia. // *Geology of Ore Deposits*. – 2024. – Vol. 66. No. 5. – pp. 477–483.
22. Volkov A.V., Prokofiev V.Y., Aristov V.V., Sidorova N.V. Conditions of formation of the Pavlik gold–sulfide–quartz deposit (Northeast of Russia) according to a study of fluid inclusions. // *Geology of Ore Deposits*. – 2024. – Vol. 66. No. 2. – pp. 191–202.

References

1. Bortnikov N.S., Gamyanin G.N., Vikentjeva O.V., Prokofiev V.Yu., Alpatov V.A., Bakharev A.G. Composition and origin of fluids in the hydrothermal system of the Nezhdaninskoye gold deposit, Sakha-Yakutia, Russia. *Geology of Ore Deposits*. 2007. Vol. 49. No. 2. pp. 99–45. (In Russ.)
2. Gorzhevskiy L.I., Zvereva E.A., Ganja G.V. Carbon-bearing terrigenous strata and their gold content. Moscow. VIEMS. 1987. 43 p. (In Russ.)
3. Granovskaya N.V. Mineralogy and thermobarogeochemistry of gold mineralization in the

South-Eastern Donbass. Proceedings of the All-Russian Mineralogical Society. 1992. Vol. 121. No. 4. pp. 29–42. (In Russ.)

4. Davydenko D.B., Davydenko E.D., Isaev V.S., Kleshchenkov A.V., Mokhov A.V., Parada S.G. Experience of identification and study of endogenous fluidization zones by a complex of remote and gasgeochemical methods. Bulletin of the Southern Scientific Center. 2014. Vol. 10. No. 1. pp. 25–34. (In Russ.)

5. Ermolaev N.P., Kotina R.P., Pashkova E.A., Sozinov N.A. Mechanisms of concentration of noble metals in terrigenous-carbonaceous sediments. Moscow. Nauchnyi Mir. 1999. 124 p. (In Russ.)

6. Zelenshchikov G.V., Kurbanov N.K., Kuchevsky P.G., Radaeva T.P. Prospects for gold-bearing Pripyat-Dneprovo-Donets avlacogen. Ores and Metals. 2001. No. 2. pp. 26–35. (In Russ.)

7. Knyazhev A.S., Terentenkov N.A., Likhachev V.A., Zelenshchikov G.V., Ustinenko M.I. On the sequence of mineralization of the Kerchik ore occurrence. In: Geological Structure and Minerals of the Rostov Region. Rostov-on-Don. Rostov State University. 1987. pp. 95–100. (In Russ.)

8. Kokin A.V. Assessment of ore objects prospectivity (theory and practice). Rostov-on-Don. Rostizdat. 2005. 384 p. (In Russ.)

9. Likhachev V.A., Zelenshchikov G.V., Terentenkov N.A. New ore occurrence of non-ferrous and noble metals in the Eastern Donbass. In: Geology and Mineral Resources of the Lower Don. Rostov-on-Don. Rostov State University. 1983. pp. 9–13. (In Russ.)

10. Mirzekhanov G.S., Mirzekhanova Z.G. Stratified gold-quartz mineralization of carbonaceous-terrigenous strata of the Southern Verkhoyany. Vladivostok. FEB AS USSR. 1991. 128 p. (In Russ.)

11. Parada S. Gold ore manifestations of the Eastern Donbass. Science in the South of Russia. 2024. Vol. 20. No. 4. pp. 33–38. DOI: 10.7868/S25000640240405. (In Russ.)

12. Parada S.G. Conditions of formation and gold content of black shale complexes of the Amur-Okhotsk folded region. The abstract of the dissertation of Dr. geol.-mineral. sciences. 25.00.11. Rostov-on-Don. RSU. 2004. 48 p. (In Russ.)

13. Savchuk Yu.S., Volkov A.V. Large and superlarge orogenic gold deposits: geodynamics, structure, genetic implications. Lithosphere. 2019. Vol. 19. No. 6. pp. 813–833. (In Russ.)

14. Chernenko M.Yu., Troshchenko V.V. Geochemical specialization of igneous and sedimentary rocks of Kerchik ore-bearing structure (Eastern Donbass). Bulletin of the Southern Scientific Center. 2012. Vol. 8. No. 4. pp. 50–57. (In Russ.)

15. Goldfarb R.J., Groves D.I., Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. Ore Geology Reviews. 2001. Vol. 18. pp. 1–75.

16. Goldfarb R.J., Groves D.I. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. Lithos. 2015. Vol. 233. pp. 2–26.

17. Groves D.I., Santosh M., Deng J. et al. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration. Mineralium Deposita. 2020. Vol. 55. pp. 275–292.

18. Seredin V.V. Distribution and formation conditions of noble metal mineralization in coal-bearing basins. Geology of Ore Deposits. 2007. Vol. 49. No. 1. pp. 1–30.

19. Seredin V.V. The AU-PGE mineralization at The Pavlovsk brown coal deposit, Primorye. Geology of Ore Deposits. 2004. Vol. 46. No. 1. pp. 36–63.

20. Torvela T., Lambert-Smith J.S., Chapman R.J. Recent advances in understanding gold deposits: from Orogeny to Alluvium. London. Geological Society. 2022. 440 p.

21. Vikentyev I.V., Bortnikov N.S. Gold deposits of Central and North Asia. Geology of Ore Deposits. 2024. Vol. 66. No. 5. pp. 477–483.

22. Volkov A.V., Prokofiev V.Y., Aristov V.V., Sidorova N.V. Conditions of formation of the Pavlik gold-sulfide-quartz deposit (Northeast of Russia) according to a study of fluid inclusions. Geology of Ore Deposits. 2024. Vol. 66. No. 2. pp. 191–202.

УДК 622.279.7

DOI: 10.46698/VNC.2025.39.56.001

Оригинальная статья

Сохранение фильтрационно-ёмкостных свойств продуктивных пластов при их временной ИЗОЛЯЦИИ

Р.А. Гасумов¹, Э.Р. Гасумов^{2,3}

¹ Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, e-mail: R.Gasumov@yandex.ru;

² Азербайджанский технический университет, Азербайджан, AZ1073, г. Баку, пр. Г. Джавида, 25, e-mail: e.gasumov@gmail.com;

³ Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Азербайджан, AZ 1010, г. Баку, пр. Азадлыг, 34

Статья поступила: 24.03.2025, доработана: 12.05.2025, принята к публикации: 15.05.2025

Резюме: Актуальность работы. В статье рассмотрено сохранение фильтрационно-ёмкостных свойств продуктивного пласта при глушении скважин – при их временной изоляции, являющейся частью технологического процесса направленного на прекращение поступления пластового флюида в ствол скважины, осуществляемого в рамках проведения капитального ремонта скважин. Исследованы особенности выбора типа и реологических параметров жидкости глушения, с учётом особенностей структуры порового пространства пласта-коллектора. Предложены критерии выбора технологий глушения скважин с временной изоляцией продуктивного пласта в условиях аномально низких пластовых давлений, позволяющих сохранить проницаемость пласта. Были систематизированы особенности жидкостей для блокирования призабойной зоны пласта при глушении скважин в условиях аномально низких пластовых давлений. Предложены составы блокирующих жидкостей с наполнителем для глушения скважин, приведены основные реологические параметры и основные характеристики для практического применения. Изучены технико-экономические особенности глушения скважин с предварительным блокированием призабойной зоны пласта в условиях аномально низких пластовых давлений. Также, в работе рассмотрены технико-экономические аспекты предложенных составов. **Целью исследования** является исследование и выбор состава блокирующих жидкостей, применяемых при глушении скважин в условиях аномально низких пластовых давлений, обеспечивающих сохранение фильтрационно-ёмкостных свойств продуктивных пластов при их временной изоляции, с определением технико-экономических особенностей. **Методом теоретического уровня** изучены, обобщены и абстрагированы результаты лабораторных и промысловых исследований, позволяющих сделать умозаключения и теоретические обобщения. Проведены физико-химические, реологические и фильтрационные исследования рассматриваемых технологических жидкостей, включая оценку блокирующих, фильтрационных и газодерживающих свойств жидкостей глушения. **Результаты исследований.** На основании анализа и обобщения результатов исследований предложены составы блокирующих жидкостей для временной изоляции продуктивного пласта при глушении скважин в условиях аномально низких пластовых давлений, и определены технико-экономические особенности рекомендуемых составов.

Ключевые слова: продуктивный пласт, скважина, АНПД, блокирующие жидкости, составы ПЗП.

Для цитирования: Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Сохранение фильтрационно-ёмкостных свойств продуктивных пластов при их временной изоляции. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 180-195. DOI: 10.46698/VNC.2025.39.56.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.39.56.001

Original paper

Preservation of filtration and capacity properties of productive formations during their temporary isolation

R.A. Gasumov¹, E.R. Gasumov^{2,3}

¹ North Caucasian Federal University, 1 Pushkina Str., Stavropol 355017, Russian Federation, e-mail: R.Gasumov@yandex.ru;

² Azerbaijan Technical University, 25 H. Javid Ave., Baku AZ1073, Azerbaijan, e-mail: e.gasumov@gmail.com;

³ Azerbaijan State Oil and Industry University, 34 Azadlig Ave., Baku AZ1010, Azerbaijan, e-mail: e.gasumov@gmail.com

Received: 24.03.2025, revised: 12.05.2025, accepted: 15.05.2025

Abstract: Relevance. The article considers the preservation of the filtration-capacitive properties of the productive formation during well killing – during temporary isolation, which is part of the technological process aimed at stopping the flow of formation fluid into the wellbore. This procedure is carried out as part of well workover operations. The features of choosing the type and rheological parameters of the killing fluid are studied, taking into account the features of the structure of the pore space of the reservoir. Criteria for choosing well killing technologies with temporary isolation of the productive formation under abnormally low reservoir pressures are proposed to maintain reservoir permeability. The features of the fluid for blocking the bottomhole zone of the formation during well killing under conditions of abnormally low formation pressures were systematized. Compositions of blocking fluids with filler for well killing are proposed, the main rheological parameters and main characteristics for practical application are given. The technical and economic features of well killing with preliminary blocking of the bottomhole formation zone under conditions of abnormally low formation pressures are studied. Also, the paper considers the technical and economic aspects of the proposed compositions. **The aim** of the research is to study and select the composition of blocking fluids used for well killing under conditions of abnormally low formation pressures, ensuring the preservation of the filtration-capacitive properties of productive formations during their temporary isolation, while assessing their technical and economic feasibility. The results of laboratory and field studies were studied, generalized and abstracted using the theoretical level method, allowing us to draw conclusions and theoretical generalizations. Physicochemical, rheological and filtration studies of the considered process fluids were carried out, including an assessment of the blocking, filtration and gas-retaining properties of the killing fluids. **Results.** Based on the analysis and generalization of the research results, compositions of blocking fluids for temporary isolation of the productive formation during well killing under conditions of abnormally low formation pressures are proposed. The technical and economic aspects of the recommended fluid compositions were determined.

Keywords: productive formation, well, ALFP, blocking fluids, compositions, bottom-hole formation zone.

For citation: Gasumov R.A., Gasumov E.R. Preservation of filtration and capacity properties of productive formations during their temporary isolation. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 180-195. DOI: 10.46698/VNC.2025.39.56.001

Введение

Для восстановления и улучшения производительности скважин, как подземных инженерных сооружений, которые предназначены для извлечения углеводородов (УВ) в процессе разработки нефтегазовых месторождений, проведением геолого-технических мероприятий (ГТМ) являются работы, направленные на поддержание целевых уровней добычи пластового флюида. Основной задачей проведения ГТМ, как комплекса действий геологического, технологического, технического и экономического характера, является способность выполнения проектных решений с целью обеспечения максимальной добычи УВ, повышения эффективности и рентабельности освоения нефтегазовых месторождений [Гасумов, Гасумов, 2024; Раупов et al., 2022]. Капитальный ремонт скважин (КРС) входит в комплекс ГТМ, проводимых на фонде эксплуатационных скважин, основной целью которых является реализация проектных решений и корректив по разработке нефтегазовых месторождений для рационального и более полного извлечения пластового флюида из продуктивной залежи. Реализация ГТМ на фонде эксплуатационных скважин при разработке нефтегазовых месторождений направлена на решение ряда задач, в том числе, поддержание устойчивой работы скважин; сохранение, восстановление и повышение производительности скважин; продление срока службы и надёжности скважин, как инженерных сооружений и т.д., позволяющих обеспечить стабильную (непрерывную) добычу УВ и эффективность разработки месторождений.

При КРС, глушение скважин является важным этапом, так как, от качества временного изолирования продуктивного пласта зависит сохранение проницаемости коллекторов и гидродинамической связи в системе «скважина-пласт». Как известно, проницаемость зависит от структуры порового пространства, трещиноватости, кавернозности пород, а также количества фаз фильтрующихся флюидов и их физико-химических свойств. С учётом этих факторов проблема сохранения проницаемости коллекторов более актуальна для скважин эксплуатируемых нефтегазовых месторождений с аномально-низкими пластовыми давлениями (АНПД). Сохранение фильтрационно-ёмкостных свойств (ФЕС) продуктивного пласта является одним из основных условий при глушении скважин, являющемся частью технологического процесса направленного на прекращение поступления пластового флюида в ствол скважины, осуществляемого в рамках проведения КРС. Структура порового пространства подвергается изменениям и разрушениям под воздействием влияния применяемых технологических жидкостей (ТЖ) для глушения скважин, особенно в условиях АНПД.

В связи с чем, выбор типа и реологических параметров жидкостей глушения (ЖГ) имеет важное значение, так как они должны учитывать особенности структуры порового пространства и обладать необходимыми свойствами – плотностью и вязкостью [Гасумов, Гасумов, 2023; Gladkov, 2014; Shagiakhmetov et al., 2020]. К жидкостям глушения, кроме технологических, также предъявляются и технико-экономические требования. В связи с чем, при выборе ТЖ для глушения скважин необходимо учитывать себестоимость оказываемых услуг и экономическую рентабельность применяемых технологий и жидкостей [Атвиновская, 2018; Гасумов, Гасумов, 2024; Кунакова и др., 2020]. На эти показатели серьёзное влияние оказывают

правильный выбор, тип и параметры ЖГ с учётом горно-геологических условий скважин, где проводятся ремонтные работы, а также контроль параметров жидкостей, технология их приготовления и применения. При выборе ЖГ должны учитываться горно-геологические и технические условия работы скважин [Атвиновская, 2018; Кунакова и др., 2020]. Правильный подбор ЖГ также позволяет избежать таких осложнений, как поглощение, нефтегазопроявления, снижение продуктивности скважин в послеремонтный период, агрессивное воздействие на внутрискважинное оборудование и т.д.

Методы исследования

Для достижения цели в исследованиях использованы методы, позволяющие собрать, проверить и систематизировать применяемые жидкости для глушения скважин, выявить неслучайные зависимости и определить причины отрицательных результатов. Методом теоретического уровня изучены, обобщены и абстрагированы результаты лабораторных и промысловых исследований, позволяющие сделать умозаключения и теоретические обобщения. Проведены физико-химические, реологические и фильтрационные исследования рассматриваемых технологических жидкостей, включая оценку блокирующих, фильтрационных и газодерживающих свойств жидкостей глушения. Метод экспериментального изучения различных физических явлений, основанный на их физическом подобии.

Результаты работы и их обсуждение

При проведении капитального ремонта скважин на месторождениях УВ, разрабатываемых в условиях аномально-низких пластовых давлений, применяется большое количество различных технологий и технологических жидкостей для глушения [Гасумов, Гасумов, 2024]. Такое разнообразие технологических решений в области ГТМ обусловлено существенным различием условий проведения ремонтных работ на месторождениях с АНПД – климатические особенности, типы и проницаемости коллекторов продуктивных горизонтов, величины пластовых температур и др. Как показывает анализ промысловых данных на нефтегазовых месторождениях применяются различные составы жидкостей для глушения скважин при КРС, большинство из которых не соответствует предъявляемым требованиям и в условиях низких пластовых давлений имеет отрицательное влияние на ФЕС продуктивного пласта. Это является причиной значительного загрязнения пласта компонентами ЖГ (кольматация твёрдыми частицами, формирование плёночных структур на поверхности пор и т.д.) в процессе создания блокирующего экрана, что неизбежно ведёт к ухудшению ФЕС и проблемам при освоении скважины, после ремонтно-восстановительных работ.

Анализ показывает, что существенным недостатком однофазных вязкоупругих блокирующих жидкостей (БЖ) на водной основе, ограничивающим их применение для глушения скважин в условиях АНПД, является то, что блокирующий экран образуется в результате их поглощения пластом с формированием различного рода химических связей между полимерными молекулами и стенками порового пространства. Причём для получения достаточного блокирующего эффекта требуется проникновение БЖ на значительную глубину в пласт, что не-

избежно ведёт к его загрязнению полимерными структурами и возникновению осложнений при освоении скважин [Вагина, Гаврилов, 2014; Гасумов, Гасумов, 2024; Gladkov, 2014].

Возникновение указанных последствий может быть в значительной степени нивелировано посредством использования БЖ, компонентный состав которых обладает способностью к гелеобразованию. Но их эффективность при блокировании скважин с коллекторами проницаемостью более 0,4-0,5Д или содержащими высокодренированные каналы в условиях АНПД может быть не достаточной ввиду низкой (по сравнению, например, с цементным камнем) прочности полимерной структуры геля и отсутствия в ней дополнительных армирующих элементов.

Наиболее существенным недостатком применения в качестве БЖ жидкостей на водной основе с твёрдыми частицами является низкая степень структурирования системы и отсутствие прочного связывания твердофазных компонентов. По результатам исследований установлено, что использование для блокирования призабойной зоны пласта (ПЗП) специальных жидкостей позволяет реализовать преимущества суспензий и однофазных вязкоупругих гелеобразующих систем. Указанные преимущества обеспечивают высокую эффективность процесса освоения скважин без существенного увеличения его продолжительности, что обеспечивает сохранение ФЕС пласта-коллектора.

При этом в зависимости от применяемого полимерного реагента и наполнителя для таких жидкостей могут быть реализованы принцип деструктирования блокирующего состава при обработке специализированными реагентными композициями, а также возможность самодеструкции в скважинных условиях отдельных компонентов, отвечающих за структурирование системы. Здесь важно отметить, что указанные процессы должны быть управляемыми и не приводить к неконтролируемому самоосвоению скважины в процессе работ.

В результате анализа промыслового и теоретического материала, определено, что для временной изоляции продуктивного пласта эксплуатационных скважин с низкими коэффициентами аномальности, наиболее перспективным является применение гелеобразующих вязкоупругих жидкостей на водной основе, обладающих способностью к деструктированию. В случае применения гелеобразующих вязкоупругих жидкостей на водной основе технологический аспект направлен на достижение лучших геолого-технических показателей при глушении скважин за счёт сохранения ФЕС пласта-коллектора и повышения результативности КРС. Существенный положительный эффект может быть достигнут в результате внедрения автоматизированной системы, обеспечивающей постоянный контроль над технологическими и расчетными оптимальными параметрами глушения скважин для оперативной корректировки показателей процесса, с целью предотвращения поглощений и осложнений в процессе проведения работ [Крылов и др., 2015; Shagiakhmetov et al., 2020; Raupov et al., 2022].

В условиях АНПД обеспечение этих требований является сложной задачей, поскольку гидродинамическое давление на пласт оказывает очень серьёзное влияние и создает высокие репрессии. С одной стороны, для надёжной изоляции в таких

условиях необходимы составы, обладающие жёсткой внутренней структурой, препятствующей смещению слоёв блокирующего состава друг относительно друга и фильтрации в пласт. С другой стороны, эти свойства существенно препятствуют эффективному освоению скважины и выводу на режим, поскольку остаточные энергетические возможности пласта очень низкие и не позволяют обеспечить полное очищение флюидопроводящих каналов. Поэтому проблема эффективного глушения скважин в условиях АНПД требует пересмотра подходов решения данной задачи [Крявкин, 2010; Gladkov, 2014].

Одним из перспективных направлений технико-технологических решений данного вопроса является совместное использование составов для временного изолирования продуктивного пласта, обладающих различной функциональной способностью по закупориванию флюидопроводящих каналов [Abrams, 1977; Гасумов, Гасумов, 2023]. Для реализации этих задач с учётом экономических и экологических аспектов наиболее перспективным является применение вязкоупругих систем на водной основе. Наиболее важным преимуществом таких технологических жидкостей является их гидрофильность. Указанные системы имеют огромный и практически неисчерпаемый потенциал для создания ТЖ с программируемыми свойствами, способных к самоорганизации и самодеструкции в заданных условиях, обладающих возможностью оказывать комплексное прецизионно точное воздействие на объект работ, при этом нанося минимальный вред естественному его состоянию [Abrams, 1977; Кичигин и др., 2023; Tagavifar et al., 2018].

Разработка и совершенствование рецептур ТЖ для глушения скважин при проведении КРС в условиях АНПД должны осуществляться с учётом соответствия физико-химических свойств составов условиям их применения.

Для оценки соответствия ТЖ конкретным условиям применения необходимо использовать следующие данные [Гасумов, Гасумов, 2024; Dick et al., 2000; Рауров et al., 2022]:

- сведения о горно-геологических условиях месторождения (пористость, проницаемость, пластовая температура и давление, минералогический состав горных пород);
- сведения о качественном и количественном составе компонентов используемых составов;
- сведения о технологических жидкостях, применяемых ранее на данном месторождении;
- результаты испытания составов на естественных или искусственных кернах, моделирующих условия продуктивного пласта для оценки технологических свойств и влияния на коллекторские свойства продуктивного пласта.

В связи с этим актуальной задачей является определение системы критериев, на основе которых осуществляется выбор БЖ и технологий глушения скважин в условиях АНПД [Гасумов, Гасумов, 2023; Korolev et al., 2020]. При выборе технологий глушения также важно учитывать характеристики интервала установки (раскрытость трещин, параметры фильтров и т. д.) с учётом изменений, которые происходят в процессе эксплуатации скважин [Вагина, Гаврилов, 2014; Amanullah et al., 2016] (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Критерии выбора технологий скважин в условиях АНПД /
Criteria for selecting well killing technologies in conditions of unfavorable
production conditions

Группы / Groups	Критерии устанавливаются / Criteria are established
1	2
Технологические / Technological	Достигать лучших геолого-технических показателей КРС при выполнении основных технологических условий по: сохранению ФЕС продуктивного пласта; обеспечению максимального снижения проникновения фильтрата жидкостей в пласт во время проведения ремонтных работ; обеспечению быстрого освоения скважин традиционными методами после ремонта; предупреждению нефтегазоводопроявлений; сохранению физико-химических свойств состава в скважинных условиях в процессе всего периода проведения работ; прокачиваемости стандартными насосными агрегатами; возможности приготовления без дополнительного оборудования и технических средств; работоспособности ТЖ в условиях отрицательных температур окружающего воздуха / To achieve the best geological and technical indicators of well workover, it is necessary to fulfill the basic technological conditions: maintaining the filtration and capacity properties of the productive formation; ensuring maximum reduction in the penetration of liquid filtrate into the formation during repair work; ensuring rapid development of wells by traditional methods after repair; preventing oil, gas and water shows; maintaining the physical and chemical properties of the composition in well conditions during the entire period of work; pumpability by standard pumping units; the possibility of preparation without additional equipment and technical means; operability of process fluids in conditions of negative ambient temperatures
Экономические / Economic	Способствовать достижению лучших технико-экономических показателей в процессе КРС. Необходимо уделять внимание выполнению основных условий: реагенты, используемые в компонентном составе ЖГ, должны быть доступны и иметь возможность приобретения у различных производителей в пределах страны; применяемые химические реагенты должны обладать оптимальным соотношением «цена-качество»; ТЖ должны иметь возможность повторного использования; технология приготовления должна предусматривать использование стандартного оборудования и технических средств; иметь низкую стоимость утилизации раствора / To facilitate the achievement of the best technical and economic indicators in the process of capital reson of wells, it is necessary to pay attention to the fulfillment of the basic conditions: reagents used in the component composition of the killing fluid must be available and be able to be purchased from various manufacturers within the country; the chemical reagents used must have an optimal price-quality ratio; liquids must be reusable; the preparation technology must provide for the use of standard equipment and technical means; have a low cost of disposal of the solution

Экологические / Ecological	Обеспечивать порядок и основные правила выполнения природоохранных требований в процессе КРС с учетом особенностей окружающей природной среды, характера существующей хозяйственной деятельности и традиционного природопользования, основными являются следующие условия: технологии не должны использовать жидкости, имеющие в своём составе химические реагенты с неизвестными санитарно-токсикологическими характеристиками; все компоненты состава должны быть сертифицированными; технологическая схема приготовления и использования ТЖ должна исключать загрязнение окружающей среды; все компоненты состава не должны оказывать вредного воздействия на работающий с ними персонал / Ensure the order and basic rules for the implementation of environmental requirements in the process of major well repairs, taking into account the characteristics of the surrounding natural environment, the nature of existing economic activity and traditional nature management, the main conditions are the following: technologies should not use liquids containing chemical reagents with unknown sanitary and toxicological characteristics; all components of the composition must be certified; the technological scheme for the preparation and use of the liquid must exclude environmental pollution; all components of the composition must not have a harmful effect on the personnel working with them
Значимость каждого из критериев зависит от оперативных задач, решаемых в конкретной ситуации / The importance of each criterion depends on the operational tasks to be solved in a specific situation	

К критериям выбора технологий глушения скважин в условиях АНПД относятся плотность и реологические характеристики ЖГ, способность выдерживать перепад давления, сохранение проницаемости керна, минимальный объём профильтрованной через трещину БЖ, минимальный градиент давления начала фильтрации при освоении скважин [Никулин и др., 2022; Mardashov, 2021]. Выбор БЖ для временного изолирования ПЗП является сложной задачей, при которой учитываются различные факторы, включая показатели пластового давления, температуры, проницаемости, приёмистости, мощности интервала перфорации, а также особенности конструкции скважины и фильтровой зоны. Были систематизированы некоторые особенности жидкости для блокирования ПЗП при глушении скважин в условиях АНПД. Блокирующие жидкости для временного изолирования продуктивного пласта имеют определённые особенности (рис. 1) [Гасумов, Гасумов, 2023].

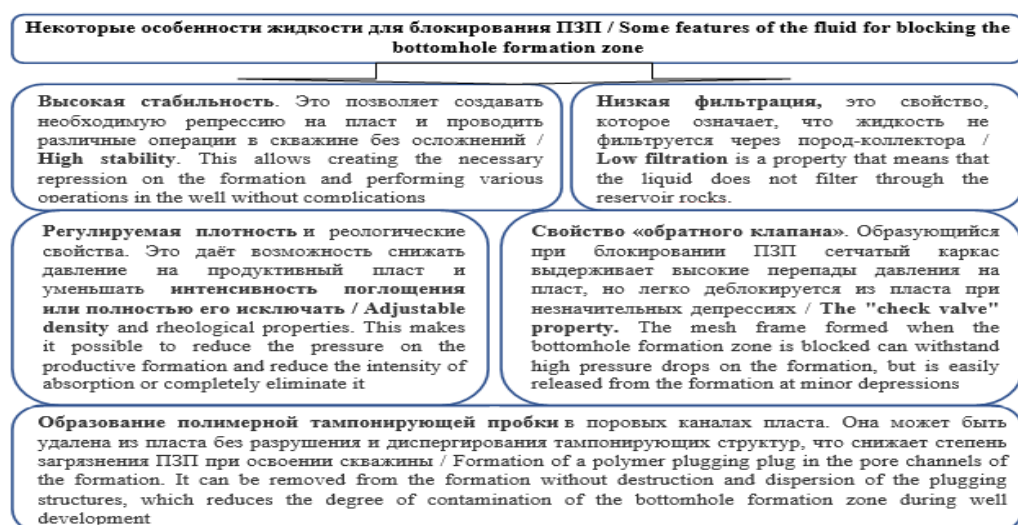


Рис. 1. Некоторые особенности блокирующих жидкостей/

Fig. 1. Some features of bloking liquids

Основной задачей изготовления прочного плотного блокирующего экрана в ПЗП, является создание препятствия проникновению ТЖ и их фильтратов в поровое пространство коллектора и предотвращение его загрязнения. Блокирующие жидкости для глушения скважин должны отвечать определённым требованиям (рис. 2) [Гасумов, Гасумов, 2023].

Технологические жидкости для временного блокирования продуктивного пласта – это различные составы, которые используются при глушении скважин для создания изолирующего экрана в интервале продуктивного пласта и обеспечения противодавления на него. Для временного блокирования продуктивного пласта в условиях АНПД применяются различные технологические жидкости, которые обладают определёнными особенностями и реологическими параметрами [Гасумов, Гасумов, 2024; Leontiev, Kleschenko, 2017] (табл. 2).

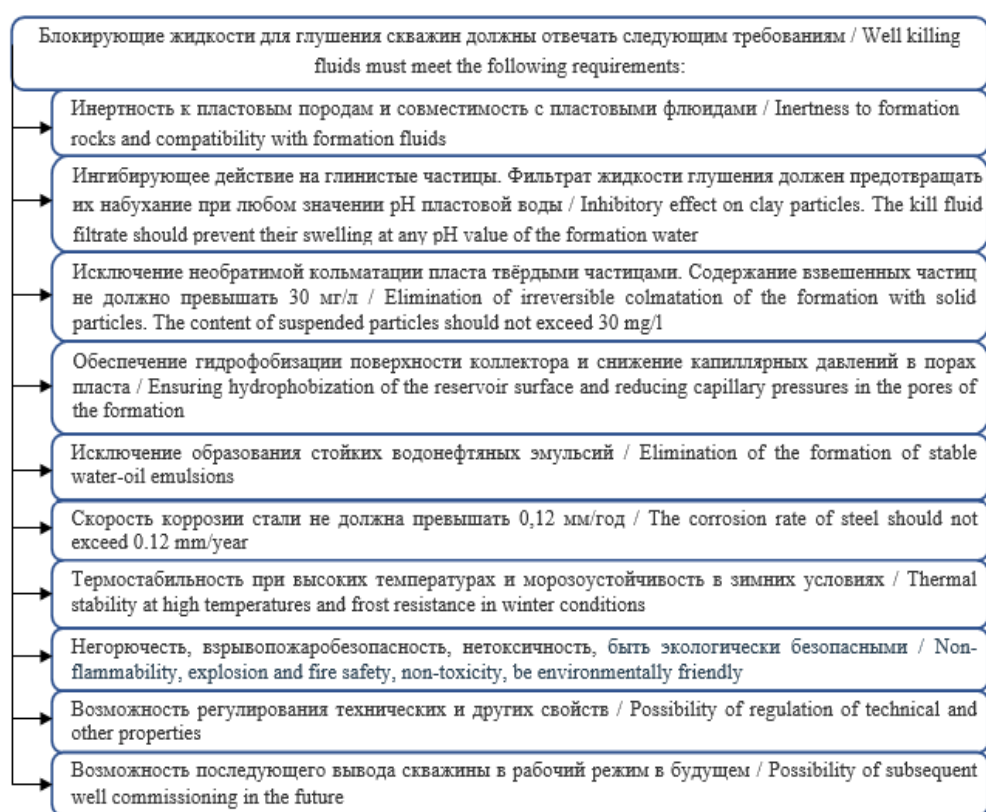


Рис. 2. Требования к блокирующим жидкостям для глушения скважин в условиях АНПД /

Fig. 2. Requirements for blocking fluids well killing under conditions of unfavorable production conditions

При выборе технологий глушения также важно учитывать характеристики интервала установки (раскрытость трещин, параметры фильтров и т. д.) с учётом изменений, которые происходят в процессе эксплуатации скважин [Вагина, Гаврилов, 2014]. В связи с чем, были сгруппированы основные требования к составу блокирующих жидкостей для временной изоляции продуктивного пласта при глушении скважин с аномально-низкими пластовыми давлениями (рис. 2).

Таблица 2/ Table 2

Технологические жидкости для временного блокирования продуктивного пласта / Technological fluids for temporary blocking of productive formation

Виды жидкостей / Types of liquids	Особенности / Features
Пенные системы / Foam systems	Пузырьки пены прочно закрепляются в фильтрационных каналах пористой среды, создавая непроницаемый пенный экран в призабойной зоне пласта / Foam bubbles are firmly fixed in the filtration channels of the porous medium., creating an impermeable foam screen in the bottomhole zone of the formation
Эмульсии / Emulsions	Их рецептура построена на использовании трёх основных компонентов: гидрофильной жидкости (чаще всего это вода и водные растворы), гидрофобной жидкости (нефть, нефтепродукты, масла) и эмульгатора / Their formula is based on the use of three main components: a hydrophilic liquid (most often water and aqueous solutions), a hydrophobic liquid (oil, petroleum products, oils) and an emulsifier
Высоко-минерализованные жидкости / Highly mineralized liquids	В качестве добавок используются хлористый калий, хлористый натрий, хлористый кальций, поташ / Potassium chloride, sodium chloride, calcium chloride, and potash are used as additives
Полимерные системы / Polymer systems	К ним относятся гидрогели, водонабухающие, эмульсионные полимеры и полимеры на водной основе (линейные и нелинейные гели) / These include hydrogels, water-swelling, emulsion polymers and water-based polymers (linear and nonlinear gels)
Гелеобразующие композиции / Gelling compositions	Принцип действия таких жидкостей основан на создании в пласте блокирующего экрана, представляющего собой полимерный гель обеспечения противодействия на него / The principle of operation of such liquids is based on the creation of a blocking screen in the formation, which is a polymer gel providing counter pressure on it

Математическая модель процесса блокирования ПЗП при глушении в условиях АНПД позволяет управлять гидродинамическими процессами в системе «скважина–пласт» [Гасумов, Гасумов, 2024]. Нами была создана математическая модель процесса закачки ТЖ в ПЗП при глушении скважин с АНПД, позволяющая управлять гидродинамическими процессами в системе «скважина-пласт», предотвращающая поглощение жидкости глушения и ухудшение коллекторских свойств продуктивного пласта. Данная модель основана на трёхэтапной схеме проведения работ: выравнивание профиля приёмистости продуктивной толщи, предотвращающее загрязнение скважинного коллектора компонентами БЖ, ее закачка и продавка с созданием необходимой репрессии в системе «скважина-пласт» [Гасумов, Гасумов, 2023].

Применение математической модели, позволяет разработать проект временной блокировки пласта и оценить предполагаемые параметры процесса закачки блоки-

рующего состава (давление/расход, продолжительность), помогает в выборе оптимальных свойств блокирующего состава и режимов его закачки, исходя из критериев эффективного глушения и последующего освоения скважин (рис. 3).

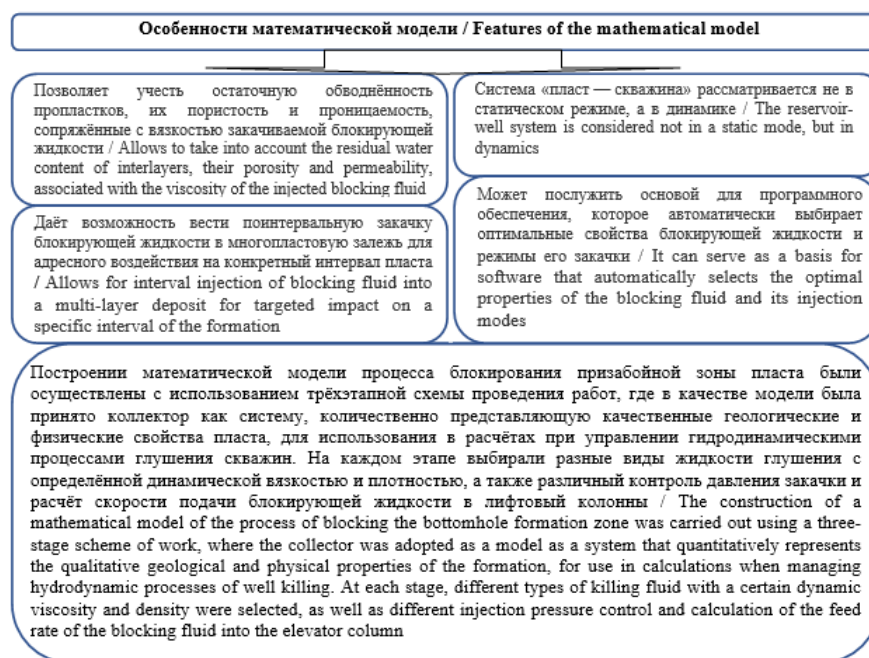


Рис. 3. Особенности математической модели процесса блокировки ПЗП при глушении скважин в условиях АНПД / Fig. 3. Features of the mathematical model of the process of blocking the bottomhole formation zone when killing wells under conditions of abnormally low formation pressures

Исследование показало, что проникновение фильтрата в ПЗП происходит под влиянием осмотического и капиллярного давлений, но в большей степени под влиянием перепада давления между пластом и скважиной. Прямой зависимости между перепадом давления и объёмом отфильтровавшейся жидкости нет. Расход фильтрата по мере формирования блокирующей корки и зоны кольматации снижается и носит экспоненциальный характер. Радиус зоны проникновения значительно больше толщины зоны и зависит от многих факторов: времени воздействия фильтрата, динамической водоотдачи, мощности пласта, пористости, температуры и т.д. [Гасумов, Гасумов, 2023].

Размеры зоны проникновения повышаются с увеличением коэффициента подвижного водонасыщения пласта. Естественно, что водонасыщение зоны проникновения уменьшается по направлению вглубь пласта, причём интенсивность его снижения зависит от коэффициента подвижного водонасыщения пласта. Проведённый расширенный анализ научно-технической информации и промысловых данных по проведению ремонтных работ, связанных с глушением скважин в условиях АНПД, позволил сформировать требования к составам для временного блокирования пласта и на этом основании были рекомендованы составы блокирующих жидкостей с наполнителем для глушения скважин в условиях АНПД (табл. 3).

Данные БЖ представляют собой дисперсную систему, в которой свойства, необходимые для достижения технического результата, обеспечиваются особенностями физико-химических процессов, происходящих при взаимодействии ингредиентов состава в указанных соотношениях друг с другом и с минералами горных пород, слагающих продуктивный пласт. Достижение высокого блокирующего эффекта

обеспечивается кольматантом – конденсируемой твёрдой фазой, которая образуется в процессе приготовления состава при взаимодействии ингредиентов и содержит два вида частиц – кристаллические и аморфные, имеющие разную форму и размеры [Вагина, Гаврилов, 2014].

Таблица 3 / Table 3

Блокирующий состав с наполнителем для глушения скважин в условиях АНПД / Blocking compound with filler for killing wells under conditions of abnormally low reservoir pressures

Блокирующий состав / Blocking composition			
Эмульсионный с наполнителем / Emulsion with filler		С конденсированной твёрдой фазой / With condensed solid phase	
компоненты / components	мас. % / mass. %	компоненты / components	мас. % / mass. %
Неонол АФ9-12 / Neonol AF9-12	2,0	Кальций хлористый / Calcium chloride	9,0
	0,3	Аммоний фосфорнокислый двузамещенный / Diammonium phosphate	11,0
МС Биохан / MS Biochan	30,0	Карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ 85/700) / Carboxymethyl cellulose (CMC 85/700)	2,0
Дизельное топливо / Diesel fuel	6,0		
КССБ-2М / KSAS-2M	61,7	Пенообразователь Морпен / Foaming agent Morpen	1,0
Вода / Water	10,0-15,0	Стеарат цинка / Zinc stearate	0,5
Наполнитель* / Filler		Вода / Water	76,0
*дополнительно к объёму блокирующей жидкости			

Эффективность использования БЖ определяется, прежде всего, соответствием физико-химических свойств состава выполняемым функциям и конкретным условиям применения. С увеличением времени эксплуатации скважин, функции жидкостей глушения и БЖ практически не меняются, но значительно усложняются условия их применения, что обусловлено снижением пластового давления, разрушением ПЗП и т. д. В связи с этим возрастают и требования к параметрам блокирующих составов.

Отсюда очевидным является тот факт, что для работы в коллекторах, имеющих различную конфигурацию проводящих каналов, необходимы неодинаковые блокирующие агенты. Представленный выше анализ блокирующих жидкостей и используемых в них кольматантов, показал, что для временной изоляции продуктивных пластов, характеризующихся однородным поровым коллектором, наиболее перспективным является применение составов с конденсируемой твёрдой фазой. Преимуществом данных составов является то, что в процессе реакций по осаждению твёрдых частиц образуются химически чистые вещества, в которых отсутствуют загрязняющие пласт примеси. Причём образуемая твёрдая фаза выбирается из числа кислоторастворимых, что позволяет восстанавливать доремонтную проницаемость даже в случае непредвиденного проникновения состава в пласт. К тому же, варьируя соотношение исходных реагентов, можно добиться образования частиц необходимого размера, с возможным преобладанием как крупных, так и мелких частиц [Вагина, Гаврилов, 2014].

Исследование различных составов применяемых в качестве БЖ показали, что, составы на углеводородной основе оказывают минимальное отрицательное влия-

ние на коллекторские свойства пласта и позволяют значительно сократить время освоения скважин после проведения ремонтных работ. Эффективность использования этих жидкостей объясняется изменением смачиваемости пористой среды, снижением поверхностного натяжения на границе состав-порода пласта, уменьшением величины капиллярных сил с одновременным снижением глубины пропитки породы водой [Дербенева и др., 2002; Gasumov, Gasumov, 2020]. Низкая плотность обуславливает их широкое применение при глушении скважин, характеризующихся АНПД. Основными критериями эффективности БЖ являются их закупоривающая (блокирующая) способность и качественное удаление из пласта, которые зависят не только от наполнителя, но и от физико-химических свойств и количественного соотношения других компонентов. В БЖ на углеводородной основе использовали неионогенные ПАВ.

Как показали исследования, наличие наполнителей в составе БЖ позволяет формировать армирующий каркас (закупоривающий экран) на стволе скважины, в интервале продуктивного горизонта и барьер препятствующий проникновению рабочей жидкости вглубь пласта. Дополнительное добавление наполнителя в блокирующую жидкость существенно улучшает закупоривающие свойства состава, необходимые для глушения скважин в условиях АНПД [Гасумов и др., 2017; Гасумов, Гасумов, 2024] (рис. 3).

Заключение

1. Установлено, что временное изолирование продуктивного пласта при глушении скважин в условиях АНПД оказывает серьёзное влияние на проницаемость коллекторов и гидродинамическую связь в системе «скважина-пласт», так как применяемые жидкости, проникая в поровое пространство, трещины и каверны пород, приводят к ухудшению фильтрационно-ёмкостных параметров ПЗП и разрушению пласта-коллектора, оказывая отрицательное влияние на эффективность эксплуатации скважины.

2. Определены основные требования к технологиям и жидкостям для глушения скважин с предварительным блокированием ПЗП в условиях АНПД, предотвращающие снижение коллекторских свойств продуктивного пласта.

3. Предложены составы блокирующих жидкостей для временной изоляции продуктивного горизонта при глушении скважин в условиях АНПД, обеспечивающие сохранение ФЕС пласта-коллектора.

4. Установлено, что наличие наполнителей в составе БЖ позволяет формировать армирующий каркас (закупоривающий экран) в ПЗП – интервале продуктивного горизонта и создаёт барьер, препятствующий проникновению рабочей жидкости вглубь пласта с АНПД.

5. Разработаны составы БЖ с наполнителем для глушения скважин при проведении ремонтных работ в условиях АНПД со сложными горно-геологическими характеристиками (при значительном снижении пластового давления, высокой дренированности продуктивных пластов, снижении прочностных свойств скелета пласта и т.д.) с учётом технико-экономической эффективности и экологической безопасности.

6. Установлено, что технико-экономическая эффективность глушения скважин с предварительным блокированием ПЗП жидкостями с наполнителем достигается за счёт сокращения затрат на проведение ремонтных работ, исключения возмож-

ных осложнений и потери добываемых УВ, увеличения межремонтного периода, повышения производительности скважин и рентабельности разработки месторождений.

Литература

1. Атвиновская Т.В. Роль жидкостей глушения в процессе ремонта скважин. // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2018. – № 2. – С. 34–41.
2. Вагина Т.Ш., Гаврилов А.А. Разработка блокирующего состава для глушения скважин на месторождениях Западной Сибири с учетом современных требований. // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2014. – № 6. – С. 38–41.
3. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Повышение эффективности глушения скважин на истощённых газоконденсатных месторождениях с сверх аномально низкими пластовыми давлениями. // Наука. Инновации. Технологии. – 2024. – № 2. – С. 165–186.
4. Гасумов Р.Р., Осадчая И.Л., Копченков В.Г., Бекетов С.Б. Наполнители растительного происхождения к блокирующим составам для глушения скважин. // Наука. Инновации. Технологии. – 2017. – № 3. – С. 127–139.
5. Гасумов Э.Р., Гасумов Р.А. Оценка гидродинамического совершенства системы скважина-пласт формируемой на этапе вскрытия продуктивного пласта. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 108–123.
6. Дербенева С.В., Южанинов П.М., Фофанов Б.В., Рунец С.А., Белоусова Н.В. Применение твёрдых ингибиторов комплексного действия (ИКД) в процессе добычи нефти. // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2002. – № 8. – С. 108–110.
7. Кичигин А.С., Нуриев Д.В., Козлов Е.Н., Дмитриев Е.В. и др. Применение мостовой пакер-пробки для временной изоляции продуктивного горизонта и вязкоупругого состава для её безопасного извлечения при продолжительных ремонтных работах на газовых скважинах. // Гронепфть. Профессионально о нефти. – 2023. – № 8(1). – С. 56–63.
8. Крылов В.И., Крецул В.В., Меденцев С.В. Современные технологические жидкости для заканчивания и капитального ремонта скважин. // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2015. – № 1. – С. 36–44.
9. Кряквин Д.А. Специфика капитальных ремонтов скважин на завершающей стадии разработки месторождений. // Нефть и газ. – 2010. – № 3. – С. 38–43.
10. Кунакова А.М., Олехнович Р.О., Клим О.В., Мурахтанова П.Г., Успенская М.В. Жидкости для глушения нефтяных скважин: учебное пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2020. – 42 с.
11. Никулин В.Ю., Мукминов Р.Р., Мухаметов Ф.Х., Нигматуллин Т.Э., Михайлов А.Г. Обзор перспективных технологий глушения скважин в условиях аномально низких пластовых давлений и рисков прорыва газа. Опыт применения эмульсионных и дисперсных жидкостей и сравнительные результаты лабораторного тестирования составов. // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т. 20. № 4. – С. 82–93.
12. Abrams A. Mud design to minimize rock impairment due to particle invasion. // Journal of Petroleum Technology. – 1977. – Vol. 29. No. 5. – pp. 586–592.
13. Amanullah M., Ramasamy J., Al-Arfaj K. Preliminary test results of an eco-friendly fluid loss additive based on an indigenous raw material. // The Saudi Aramco Journal of Technology. – 2016. – pp. 48–54.
14. Dick M., Heinz T., Svoboda C., Aston M. Optimizing the selection of bridging particles for reservoir drilling fluids. // Paper presented at the SPE International Symposium on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana. – 2000. – No. SPE-58793-MS. DOI: 10.2118/58793-MS.
15. Gladkov P. Development of a new well-killing fluid based on oil-wetting agent NG-1 for polymineral low-permeable reservoirs. // World Applied Sciences Journal. – 2014. – Vol. 31. No. 6. – pp. 1078–1081.

16. Korolev M., Rogachev M., Tananykhin D. Regulation of filtration characteristics of highly watered terrigenous formations using complex chemical compositions based on surfactants. // *Journal of Applied Engineering. Science Original Scientific*. – 2020. – No. 1(1)-671. – pp. 147–156.
17. Leontiev D.S., Kleschenko I.I. Development and study of peat-humate solutions for drilling and repairing of oil and gas wells. // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2017. – Vol. 12. No. 19. – pp. 9023–9031.
18. Mardashov D.V. Development of blocking compositions with a bridging agent for oil well killing in conditions of abnormally low formation pressure and carbonate reservoir rocks. // *Journal of Mining Institute*. – 2021. – Vol. 251. – pp. 617–626.
19. Mardashov D.V., Rogachev M.K., Zeigman Y.V., Mukhametshin V.V. Well Killing technology before workover operation in complicated conditions. // *Energies*. – 2021. – No. 14(654). – 15 p.
20. Raupov A.A., Aminov A.M., Igamberdiyeva L.Z. Preservation of the filtration capacity of the formation by increasing the strength of the crust and colmatating ability of the drilling fluid. // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. – 2022. – Vol. 1068(1). Art. No. 012001. DOI: 10.1088/1755-1315/1068/1/012001.
21. Shagiakhmetov A.M., Podoprighora D.G., Terleyev A.V. The study of the dependence of the rheological properties of gelforming compositions on the crack opening when modeling their flow on a rotational viscometer. // *Periodico Tche Quimica*. – 2020. – Vol. 17. No. 34. – pp. 933–939.
22. Tagavifar M., Jang S., Chang L., Mohanty K. Controlling the composition, phase volume, and viscosity of microemulsions with cosolvent. // *Fuel*. – 2018. – Vol. 211. – pp. 214–222.

References

1. Atvinovskaya T.V. The role of killing fluids in the well repair process. *Bulletin of GSTU named after P.O. Sukhoi*. 2018. No. 2. pp. 34–41. (In Russ.)
2. Vagina T.Sh., Gavrilov A.A. Development of a blocking composition for killing wells in Western Siberian fields taking into account modern requirements. *Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea*. 2014. No. 6. pp. 38–41. (In Russ.)
3. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Improving the efficiency of well killing at depleted gas condensate fields with ultra-abnormally low reservoir pressures. *Science. Innovations. Technologies*. 2024. No. 2. pp. 165–186. (In Russ.)
4. Gasumov R.R., Osadchaya I.L., Kopchenkov V.G., Beketov S.B. Fillers of plant origin for blocking compositions for well killing. *Science. Innovations. Technologies*. 2017. No. 3. pp. 127–139. (In Russ.)
5. Gasumov E.R., Gasumov R.A. Evaluation of the hydrodynamic perfection of the well-formation system formed at the stage of opening the productive formation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 108–123. (In Russ.)
6. Derbeneva S.V., Yuzhaninov P.M., Fofanov B.V., Runets S.A., Belousova N.V. Application of solid inhibitors of complex action (ICA) in the process of oil production. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2002. No. 8. pp. 108–110. (In Russ.)
7. Kichigin A.S., Nuriev D.V., Kozlov E.N., Dmitriev E.V. et al. Implementation of temporary packer isolation of productive zones for long-term gas well workover operations and viscoelastic system for safe packer removal. *Proneft. Professionals about Oil*. 2023. No. 8(1). pp. 56–63. (In Russ.)
8. Krylov V.I., Kretsul V.V., Medentsev S.V. Modern process fluids for well completion and workover. *Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea*. 2015. No. 1. pp. 36–44. (In Russ.)
9. Kryakvin D.A. Specifics of well workovers at the final stage of field development. *Oil and Gas*. 2010. No. 3. pp. 38–43. (In Russ.)
10. Kunakova A.M., Olekhovich R.O., Klim O.V., Murakhtanova P.G., Uspenskaya M.V. Fluids for killing oil wells. *Textbook. Saint Petersburg. ITMO*. 2020. 42 p. (In Russ.)

11. Nikulin V.Yu., Mukminov R.R., Mukhametov F.Kh., Nigmatullin T.E., Mikhailov A.G. Overview of promising killing technologies in conditions of abnormally low formation pressures and risks of gas breakthrough. Part 2. Experience with emulsion and dispersion fluids and comparative results of laboratory testing of formulations. *Petroleum Engineering*. 2022. Vol. 20. No. 4. pp. 82–93. (In Russ.)
12. Abrams A. Mud design to minimize rock impairment due to particle invasion. *Journal of Petroleum Technology*. 1977. Vol. 29. No. 5. pp. 586–592.
13. Amanullah M., Ramasamy J., Al-Arfaj K. Preliminary test results of an eco-friendly fluid loss additive based on an indigenous raw material. *The Saudi Aramco Journal of Technology*. 2016. pp. 48–54.
14. Dick M., Heinz T., Svoboda C., Aston M. Optimizing the selection of bridging particles for reservoir drilling fluids. Paper presented at the SPE International Symposium on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana. 2000. No. SPE-58793-MS. DOI: 10.2118/58793-MS.
15. Gladkov P. Development of a new well-killing fluid based on oil-wetting agent NG-1 for polymineral low-permeable reservoirs. *World Applied Sciences Journal*. 2014. Vol. 31. No. 6. pp. 1078–1081.
16. Korolev M., Rogachev M., Tananykhin D. Regulation of filtration characteristics of highly watered terrigenous formations using complex chemical compositions based on surfactants. *Journal of Applied Engineering. Science Original Scientific*. 2020. No. 1(1)-671. pp. 147–156.
17. Leontiev D.S., Kleschenko I.I. Development and study of peat-humate solutions for drilling and repairing of oil and gas wells. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12. No. 19. pp. 9023–9031.
18. Mardashov D.V. Development of blocking compositions with a bridging agent for oil well killing in conditions of abnormally low formation pressure and carbonate reservoir rocks. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 251. pp. 617–626.
19. Mardashov D.V., Rogachev M.K., Zeigman Y.V., Mukhametshin V.V. Well Killing technology before workover operation in complicated conditions. *Energies*. 2021. No. 14(654). 15 p.
20. Raupov A.A., Aminov A.M., Igamberdiyeva L.Z. Preservation of the filtration capacity of the formation by increasing the strength of the crust and colmatating ability of the drilling fluid. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1068(1). Art. No. 012001. DOI: 10.1088/1755-1315/1068/1/012001.
21. Shagiakhmetov A.M., Podoprighora D.G., Terleyev A.V. The study of the dependence of the rheological properties of gelforming compositions on the crack opening when modeling their flow on a rotational viscometer. *Periodico Tche Quimica*. 2020. Vol. 17. No. 34. pp. 933–939.
22. Tagavifar M., Jang S., Chang L., Mohanty K. Controlling the composition, phase volume, and viscosity of microemulsions with cosolvent. *Fuel*. 2018. Vol. 211. pp. 214–222.

УДК 553.981

DOI: 10.46698/VNC.2025.99.81.001

Оригинальная статья

Ресурсы метана в подработанном массиве – как опасное может стать полезным

И.В. Рыбин

Южный научный центр Российской академии наук, Россия, 344006,
г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41;

Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-
конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского
дела, Россия, 283086, г. Донецк, ул. Челюскинцев, 291,
e-mail: rybin@ssc-ras.ru, iliaribin@mail.ru

Статья поступила: 07.03.2025, доработана: 30.05.2025, принята к публикации: 03.06.2025

Резюме: Актуальность работы. В выработанном пространстве закрываемых угольных шахт накапливается метан и токсичные газы (углекислый газ, окись углерода, сероводород, радиоактивные эманации и др.), обескислороженный воздух. **Цель работы.** При ликвидации шахт путем их затопления (так называемым «мокрым» способом), шахтные газы, так или иначе, вытесняются на поверхность и здесь они могут выступать и как техногенное полезное ископаемое, и как источник повышенной бытовой и производственной опасности. **Методы работы.** Рекомендуемые ныне процедуры для предотвращения проникновения метана в здания и сооружения: не прекращаемое проветривание, цементация полов и подвальных помещений, дегазация канавами и скважинами возле строений имеют непостоянный эффект и не дают гарантию безопасности по причине смены природы перемещения газовых масс в результате последующего увеличения поверхности затопления горных выработок. В целом по Восточному Донбассу можно было бы организовать добычу угольного газа в объеме 100 млн м³/год, что позволило бы обеспечить экологически чистым топливом или электроэнергией все поселки вокруг закрытых газообильных угольных шахт и создать рабочие места бывшим шахтерам. **Результаты работы.** В частности, приведен расчет показателя средней интенсивности газовыделения на 1 м² выработанной площади горного отвода. Приведенный расчет сделан для горно-геологических условий Восточного Донбасса, на котором преимущественно господствуют более пологие углы наклона пластов, малая мощность толщ горных пород, плотность метановых ресурсов соответствует 125 млн м³/км². Стоит отметить, что Печорский бассейн имеет плотность в 1,5 раза выше, а Кузнецкий бассейн – в 3 раза больше, а зачастую доходит и до 10 раз, но уже при крутых углах падения и многометровой мощности пластов, а значит и опасность насыщения газами зданий и сооружений в зоне горного отвода закрытой и затопляемой шахты будет намного выше. На сегодняшний день угроза загазованности заглубленных зданий на подработанных площадях идет на убыль, но не исключена основная проблема – выход подземных шахтных вод на поверхность и загрязнение гидросети высокоминерализованными водами.

Ключевые слова: пласт, уголь, слой, горный отвод, добыча, метан, Восточный Донбасс.

Благодарности: Публикация подготовлена в рамках реализаций: ГЗ ЮНЦ РАН на 2025 г., № гос.рег. 125011700416-4; ГЗ РАН ИМИ, №. гр. проекта 124061700022-3 от 17.06.2024.

Для цитирования: Рыбин И.В. Ресурсы метана в подработанном массиве – как опасное может стать полезным. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 196–205. DOI: 10.46698/VNC.2025.99.81.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.99.81.001

Original paper

Methane resources in the undermined strata: from hazard to valuable resource

I.V. Rybin

Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Ave.,
Rostov-on-Don 344006, Russian Federation;

Republican academic research and design institute of mining geology, rock mechanics,
geophysics and mine surveying, 291 Chelyuskintsev Str., Donetsk 283086, Russian
Federation, e-mail: rybin@ssc-ras.ru, iliaribin@mail.ru

Received: 07.03.2025, revised: 30.05.2025, accepted: 03.06.2025

Abstract: Relevance. Methane and toxic gases (carbon dioxide, carbon monoxide, hydrogen sulfide, radioactive emanations, etc.), deoxygenated air accumulate in the mined space of the closed coal mines. **Aim.** When mines are liquidated by flooding them (the so-called “wet” method), mine gases, one way or another, are displaced to the surface where they can serve both as a technogenic mineral and as a source of increased household and industrial danger. **Methods.** Currently recommended procedures to prevent methane penetration into buildings and structures: continuous ventilation, cementation of floors and basements, degassing by ditches and wells near buildings have a variable effect and do not guarantee safety due to a change in the nature of the movement of gas masses as a result of a subsequent increase in the surface of flooding of mine workings. In general, in the Eastern Donbas, it would be possible to organize coal gas production in the amount of 100 million m³/year, which would provide environmentally friendly fuel or electricity to all villages around closed gas coal mines and create jobs for former miners. **Results.** In particular, the calculation of the average intensity of gas emission per 1 m² of the mined area of the mining allotment is given. The above calculation was made for the mining and geological values of the Eastern Donbas, which is mainly dominated by more gentle inclination angles of formations, low thickness of rock strata, the density of methane resources corresponds to 125 million m³/km². It is worth noting that the Pechora basin has a density 1.5 times higher, and the Kuznetsk basin – 3 times more, and often reaches up to 10 times, but already at steep angles of incidence and multi-meter thickness of the beds, which means that the danger of gas saturation of buildings and structures in the mining allotment zone closed and flooded mine will be much higher. To date, the threat of gas contamination of buried buildings in the worked-out areas is declining, but the main problem is not excluded – the release of underground mine water to the surface and pollution of the hydraulic network with highly mineralized water.

Keywords: formation, coal, layer, mining allotment, mining, methane, Eastern Donbas.

Acknowledgements: The paper was prepared as part of the implementations: state assignment of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences for 2025, state registration No. 125011700416-4; state assignment of Republican academic research and design institute of mining geology, rock mechanics, geophysics and mine surveying, project No. 124061700022-3 dated 17.06.2024.

For citation: Rybin I.V. Methane resources in the undermined strata: from hazard to valuable resource. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 196-205. DOI: 10.46698/VNC.2025.99.81.001

Введение

В выработанном пространстве закрываемых угольных шахт накапливается метан и токсичные газы (углекислый газ, окись углерода, сероводород, радиоактивные эманации и др.), обескислороженный воздух [Проблемы ..., 2005; Агаев и др., 2021]. При ликвидации шахт путем их затопления (так называемым «мокрым» способом), шахтные газы, так или иначе, вытесняются на поверхность и здесь они могут выступать и как техногенное полезное ископаемое, и как источник повышенной бытовой и производственной опасности [Коломенский, Гипич, 2006; Архипов, 2024]. В 1995–99 гг. в России закрыты десятки газообильных шахт, которые могут стать, как источником загрязнения атмосферы, так и объектом промышленной добычи метана [Угольная ..., 2000; Попов, 2006]. Сведения об уже закрытых шахтах, объемах отработанного горного пространства и прогнозных ресурсах накопленного в них газа приведены в таблице 1. Шахтные газы угольных месторождений могут при неконтролируемом их выделении на поверхность выступать и в роли «вредного» ископаемого, постоянно приводящего к негативным последствиям (в том числе с трагическим исходом) в связи с возгораниями и взрывами метана в закрытых помещениях, отравлениями людей токсичными шахтными газами [Герике и др., 2024]. Снятие этой негативной функции шахтных газов и разработка мероприятий по обеспечению производственной и бытовой безопасности на горных отводах закрытых шахт связаны с проведением экологического мониторинга [Труфанов, Труфанов, 2006].

Методы исследований

Во Всероссийском научно-исследовательском геологоразведочном институте угольных месторождений («ВНИГРИуголь») разработаны принципы создания системы экологического мониторинга как отдельных закрываемых угольных шахт (локальный уровень), так и угольных бассейнов в целом (региональный уровень) [Труфанов и др., 2004]. При ликвидации шахт, после прекращения водоотлива и вентиляции, атмосфера выработанного пространства обогащается метаном и другими горными, а также токсичными газовыми смесями благодаря излиянию их из остатков угольных пород и за счет процессов гниения разнообразных веществ в горных выработках, на которые тратится кислород воздуха, оставшийся после прекращения вентиляции [Портнов и др., 2021; Пинаев, Пинаев, 2022]. При затоплении горных выработок «мертвый» воздух вытесняется к поверхности. Например, при использовании скважин, находящихся в пределах горного отвода не функционирующей шахты «Краснодонская» Восточного Донбасса, возможно добыть метан благодаря каждой скважине в приблизительном объеме около 1 млн м³/год, что даст возможность при эксплуатации 6–7 скважин снабжать в течение 30 лет рядом расположенный населенный пункт с численностью населения около 10000 человек [Гамов, Рылов, 2006]. В данном случае улучшалась бы ситуация с точки зрения экологии, потому что отработанное пространство под населенным пунктом очистится от «мертвой» воздушной смеси, которая проникала бы на дневную поверхность в результате заполнения шахты водой [Коломенская, 2006]. В целом по Восточному Донбассу можно было бы организовать добычу угольного газа в объеме 100 млн м³/год, что позволило бы обеспечить экологически чистым топливом или электроэнергией все поселки вокруг закрытых газообильных угольных шахт и создать рабочие места бывшим шахтерам.

Таблица 1 / Table 1

Сведения о ресурсах газа в выработанных пространствах, подработанных массивах и неотработанных площадях закрытых высокогазобильных шахт [Труфанов и др., 2004] /
Information on gas resources in developed spaces, underworked massifs and unworked areas closed high-gas mines
[Trufanov et al., 2004]

Шахта/Mine*	Глубина подчета/разработки Count depth/developments	Годовая мощность, тыс. т / Annual capacity, thousand tons	Марка/Brand**	Фактический срок работы шахты, лет / Actual mine life, years	Газоносность, м ³ /т / Gas content, m ³ /t	Извлечение угля, млн т / Coal extraction, million tonnes	V ₁ объем извлеченного угля, м ³ V ₁ volume of extracted coal, m ³	V ₂ объем извлеченной породы, м ³ V ₂ volume of extracted rock, m ³	$\Sigma = V_1 + V_2$, млн м ³ $\Sigma = V_1 + V_2$, million m ³	Коэффициент извлечения газа из выработанного пространства/ Gas recovery factor	Прогнозные объемы извлечения газа, млн м ³ / Forecast gas recovery volumes, million m ³	Подработанная площадь, км ² Developed area, km ²	Объем газа в неотработанной части, млн м ³ / Volume of gas in the undeveloped part, million m ³	Площадь оценки ресурсов, км ² Resource assessment area, km ²	Плотность ресурсов млн м ³ /км ² Resource density million m ³ /km ²	Суммарный объем газа, млн м ³ Total gas volume, million m ³
1	235/235	300	Ж/Ф	42	–	12	8	1	9	0,7	6	–	–	–	–	–
2	1700/370	240	Т/С	54	32	13	9	1	10	0,7	7	–	1800	22	79	1807
3+4	750/500	750	А/А	40	36	30	20	2	22	0,7	15	17	880	7	128	895
5	700/400	650	К, ОС/С, TS	35	10	23	15	1,5	16,5	0,7	12	–	–	–	–	–
6	480/468	690	К, Т, ОС/С, S, TS	47	–	32	20	2	22	0,7	15,4	–	–	–	–	–
7	780/755	250	К, ОС/С, TS	50	16	12,5	7,8	0,7	8,5	0,7	6	–	232	3	84	238
8	640/450	150	К/С	49	19	7,3	4,8	0,5	5,3	0,7	4	–	216	2	124	220
9	–/490	140	Ж/Ф	57	17	8	5	0,5	5,5	0,7	4	–	300	2,5	120	304
10	1100/650	100	ОС/TS	43	27	4,3	3	0,5	3,5	0,7	3	–	236	4,4	54	239

Примечание*: 1) Донецкая; 2) Тацинская; 3+4) Краснодонская 16/17 + Синегорская; 5) Восточная; 6) Горняцкая; 7) Центральная; 8) Изваринская; 9) Гундоровская; 10) 10 № 5 Белокалитвенское шахтоуправление (БК ШУ). / Note*: 1) Donetsk; 2) Tatsinskaya; 3+4) Krasnodonskaya 16/17 + Sinegorskaya; 5) Eastern; 6) Gorn'yatskaya; 7) Central; 8) Izvargin'skaya; 9) Gundorov'skaya; 10) 10 No. 5 Belokalitvensky mine management (BK MM).

Примечание**: Ж – жирный; Т – тощий; А – антрацит; К – коксовый; ОС – отощенный слабопекучий. / Note**: F – fatty; S – skinny; A – anthracite; C – coke; TS – thin sintered.

При среднем сроке затопления шахты (порядка 5 лет) основная часть газа, заключенная в выработанном и подработанном пространстве, будет вытеснена наверх посредством старых стволов, скважин, природных и антропогенных трещин в самых различных местах горного отвода.

Например, вычислен показатель интенсивности газового присутствия для выработанной территории горного отвода шахты «Краснодонецкая», располагающейся на площади в 17 км², при этом объем шахтной рудничной воздушной смеси, законсервированной в отработанной полости составляет 22 млн м³, а временной период его выдавливания составляет 5 лет.

На 1 м² выработанной площади горного отвода показатель средней интенсивности газовыделения рассчитывается по формуле (1):

$$V_{1\text{м}^2} = \frac{V_p}{T \cdot t \cdot S_1} \quad (1)$$

где $V_{1\text{м}^2}$ – объем газовыделения на 1 м² в м³;

V_p – объем ресурсов газа в выработанном и подработанном массиве в шахте, м³;

T – количество лет затопления;

t – количество дней в году;

S_1 – подработанная площадь, км².

В результате применения формулы (1), получаем количественный результат в виде формулы (2):

$$V_{1\text{м}^2} = \frac{22000000}{5 \cdot 365 \cdot 17} = 0,0007 \text{ м}^3 = 0,7 \text{ л} \quad (2)$$

Подвал или погреб в частном доме в среднем имеет площадь около 9 м², а объемное пространство составляет 18 м³, в которое просочится количество метана в сутки равное 6,3 литра. Проще говоря, количество метана в подвале достигнет значений приблизительно 0,035%. Можно посчитать, что к концу первого месяца в непродуваемом погребе или подвале дома содержание метана дойдет до значения в 1%, которое уже является опасной концентрацией [Проблемы ..., 2005]. Вход в подвальное помещение необходимо закрыть вплоть до максимального проветривания. Однако из-за неравномерного газового проявления на поверхность поступление газа в то или иное помещение может изменяться в несколько раз, что резко ухудшит газоопасность отдельных жилых и производственных помещений.

Результаты исследований и их обсуждение

Приведенный расчет сделан для горно-геологических условий Восточного Донбасса, на котором преимущественно господствуют более пологие углы наклона пластов, малая мощность толщ горных пород, плотность метановых ресурсов соответствует 125 млн м³/км². Стоит отметить, что Печорский бассейн имеет плотность в 1,5 раза выше, а Кузнецкий бассейн – в 3 раза больше, а зачастую доходит и до 10 раз, но уже при крутых углах падения и многометровой мощности пластов, а значит и опасность насыщения газами зданий и сооружений в зоне горного отвода закрытой и затопляемой шахты будет намного выше.

Рекомендуемые ныне процедуры для предотвращения проникновения метана в здания и сооружения: не прекращаемое проветривание, цементация полов и под-

вальных помещений, дегазация канавами и скважинами возле строений имеют непостоянный эффект и не дают гарантию безопасности по причине смены природы перемещения газовых масс в результате последующего увеличения поверхности затопления горных выработок [Проблемы ..., 2005].

В пределах горного отвода затопляемой шахты выполнение замеров периодического характера в рамках газового мониторинга не даст достоверный прогноз опасных областей по причине непостоянного наблюдения. В тот же момент, всю область выработанного пространства под населенным пунктом невозможно охватить сенсорами постоянной регистрации состава газовой смеси по причине их высокой стоимости и трудности применения. По причине этого, главным достоверным способом, дающим гарантию безопасного нахождения людей на подработанных территориях ликвидируемых шахт, считается дегазация выработанного и еще не затопленного пространства скважинами, пробуренными с дневной поверхности и оборудованными вакуумными насосами [Федотов, 2024]. Если в составе шахтного воздуха, вытесняемого к поверхности, концентрация метана превысит 30%, то эта газо-воздушная смесь подлежит утилизации.

Заблаговременная дегазация и утилизация метана позволит:

- получить экологически чистый энергоноситель для утилизации через: газораспределительную сеть, сжижение газа и, наиболее рационально, переработку метана в электроэнергию в микротурбинных генераторах или газогенераторных электростанциях непосредственно на месте добычи метана из скважин;
- исключить возможность выделения «мертвого» шахтного воздуха в непредсказуемых местах поверхности на территории населенных пунктов;
- обеспечить возможность эффективной эксплуатации дегазированных угольных пластов на шахтах, ранее нерентабельных из-за высокой газовой обильности;
- сохранить озоновый слой от разрушения его шахтным метаном, а температурный режим атмосферы от «парникового эффекта» за счет поступления метана.

Опыт добычи метана из закрытых газовых шахт в России отсутствует. Ликвидация российских шахт производится способом полного затопления.

В этом случае извлечение метановой газовой смеси из выработанного пространства шахт исключается. Возможна только добыча метана из оставшихся неотработанных, не дегазированных запасов угля.

Опыт извлечения метана из закрытых шахт за рубежом (Германия, Франция, Великобритания, Бельгия и др.) свидетельствует о том, что из одной шахты можно извлекать от 10 до 66 млн м³/год в течение от 6 до 26 лет [Peng et al., 2023; Kursunoglu, Ankara, 2024; Shao et al., 2024].

Выводы

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы.

Ликвидация и последующее затопление газообильных угольных шахт привели к резкому ухудшению экологической обстановки:

- появилась угроза поступления «мертвого» воздуха в жилые и производственные здания и сооружения;
- происходит подтопление населенных пунктов и сельскохозяйственных угодий шахтными водами;
- наблюдается проседание поверхности.

Для снижения этих негативных последствий закрытия шахт и хотя бы, частич-

ного решения вопроса с исправлением ситуации по минимизации дефицита топлива, предлагаются следующие мероприятия:

- организация мониторинга на горных отводах ликвидированных и затопляемых шахт с целью прогнозирования зон опасных для проживания и производственной деятельности;
- оценка потенциальных объемов и состава шахтных газов («мертвого» воздуха), заключенных в выработанном и подработанном пространстве;
- определение мест, объемов и сроков поступления шахтных газов на поверхность;
- оценка заблаговременной дегазации выработанного пространства и подработанного массива скважинами, пробуренными с поверхности;
- определение возможности утилизации откачиваемых газов для производства электроэнергии на месте их извлечения в микротурбинных генераторах или как газообразного топлива в коммунальном хозяйстве;
- организация опытных комплексных полигонов во всех бассейнах для проведения опытно-промышленных работ по добыче и утилизации метана из выработанного пространства закрытых шахт, неотработанных запасов углей на горных отводах этих шахт, для отработки методики газо-экологических исследований на площадях действующих и закрытых шахт.

Дегазация выработанных пространств ликвидируемых шахт с возможностью утилизации газовоздушных смесей, также не осуществлялась по следующим причинам:

- ликвидация угольных шахт была проведена путем естественного их затопления подземными водами, засыпки стволов, иногда на всю глубину их проходки материалом пород из терриконов;
- засыпка стволов производилась без монтажа каких-либо коммуникаций для откачки газа по засыпанным стволам;
- бурение специальных скважин для откачки газа из выработанного пространства при ликвидации шахт даже не предусматривалось проектами ликвидации.

Предполагалось, что выходы метана на поверхность в опасных концентрациях будут отмечаться довольно часто, так как первоначальные ресурсы его в выработанном пространстве исчислялись по каждой шахте в млн м³, но первоначальные прогнозы не оправдались за прошедшие 5–7 и даже 10 лет. Случаи обнаружения концентраций метана свыше 0,5 % при проведенных десятках тысяч замеров над выработанным затопляемым пространством были отмечены чрезвычайно редко. В вытесняемой из шахт газовоздушной смеси иногда отмечались повышенные содержания двуокси углерода и пониженные содержания кислорода. Причине ничтожной доли выхода метана на поверхность можно дать следующее объяснение. Находившийся в выработанном пространстве метан, выдавливался силой гидростатического давления к поверхности через угольные насыщенные толщи пород, где уголь неотработанных пластов-спутников и пропластков был дегазирован 20–30 лет назад при добыче угля. Выдавливаемый метан попадал в техногенные трещины, не имеющие свободного выхода к поверхности, и вступал в сорбционную связь с ранее дегазированным углем. Деметанизированная газо-воздушная смесь в итоге продавливалась на поверхность, но уже с неопасной концентрацией метана или вообще без метана. Поскольку процесс затопления шахты продолжался несколько лет, то создались наиболее благоприятные условия для «вторичной» сорбции метана при контакте с угольным веществом.

Причина обнаружения повышенных концентраций метана по отдельным пробам зачастую объяснялась тем, что они отбирались вблизи выходов на поверхность старых горных выработок, устьев буровых скважин, а возможно и дизъюнктивных или техногенных трещин, где движение газов было свободным. На сегодняшний день большинство ликвидированных шахт, затоплены на 2/3, а иногда почти до поверхности. Из некоторых шахт стали изливаться подземные воды на поверхность, то есть уровень затопления превысил естественный уровень грунтовых вод, существовавший до начала ведения горных работ 30–50 лет назад.

Первоначальный прогноз о прекращении подъема подземных шахтных вод при достижении естественного уровня во многих случаях не подтвердился, так как в процессе углубки шахт горными выработками вскрывались водонапорные горизонты, которые ранее были ограничены водонепроницаемыми породами. Непредсказуемый выход шахтных вод на поверхность создает сложнейшую проблему отвода чрезвычайно загрязненных вод, находившихся в контакте с поверхностями горных выработок на протяжении многих лет.

Заключение

В результате недостаточно продуманной, так называемой, «реструктуризации» угольных шахт произошло резкое падение добычи угля по отдельным бассейнам, например, в Восточном Донбассе, с 30 до 8 млн т/год. Безвозвратно потеряны свыше 200 млн м³ метана, оставшегося в выработанных пространствах и фактически погребенного в затопленных выработках. Не исключено, что и подготовленные к выемке угольные пласты высокой категории разведанности никогда не будут отработаны, так как стволы, засыпанные полностью на глубину порядка 500 и более метров, не подлежат восстановлению из-за засыпки породой с негабаритными не извлекаемыми материалами, включавшими бетонные блоки и арматуру, а ресурсы метана в угольных пластах, в зоне горных отводов затопленных шахт могут оказаться непригодными для добычи метана, поскольку многолетний контакт с затопленным водой пространством может оказать непредсказуемое влияние на физико-химические свойства условий газоносности в угольных пластах. Именно на этих запасах метана, в угольных пластах вблизи действующих шахт должны были проводиться опытные работы по добыче метана, так как были известны все параметры, включая степень газоотдачи.

На сегодняшний день угроза загазованности заглубленных зданий на подработанных площадях идет на убыль, но не исключена основная проблема – выход подземных шахтных вод на поверхность и загрязнение гидросети высокоминерализованными водами.

Литература

1. Агаев Р.А., Власенко В.В., Дудля Е.Е., Ключев Э.С., Притула Д.А. Горно-геологические факторы добычи метана через поверхностные скважины пневмогидродинамическим воздействием. // Современные проблемы механики. – 2021. – № 44(2). – С. 127–133.
2. Архипов И.А. Проблемы мониторинга парниковых газов при открытой разработке угля. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 4 (специальный выпуск 10). – 44 с.
3. Гамов М.И., Рылов В.Г. Динамические ресурсы метанообильных зон угольных месторождений Восточного Донбасса. // Материалы международной конференции «Проблемы геологии и освоения недр юга России». Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2006. – С. 204–206.

4. Герике Б.Л., Леконцев Ю.М., Новик А.В. Компенсаторы подсоса воздуха в шахтных трубопроводах каптированного метана. // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – № 3(173). – С. 22–32. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-3-22-32.
5. Коломенская В.Г. Состояние и проблемы развития минерально-сырьевой базы углей юга России. // Материалы международной конференции «Проблемы геологии и освоения недр юга России». Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2006. – С. 220–223.
6. Коломенский Г.Ю., Гипич Л.В. Геоэкологические проблемы техногенных месторождений угольного ряда. // Материалы международной конференции «Проблемы геологии и освоения недр юга России». Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2006. – С. 365–366.
7. Пинаев А.В., Пинаев П.А. Взрыв, детонация в смесях метан-водород-воздух, метан-водород-воздух-взвесь угля. // Вестник научного центра ВОСТНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2022. – № 3. – С. 26–38. DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.23.30.003.
8. Попов В.В. Проблемы поисков, разведки и промышленного освоения газозольных месторождений юга России. // Материалы международной конференции «Проблемы геологии и освоения недр юга России». Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2006. – С. 168–170.
9. Портнов В.С., Иманбаева С.Б., Рева Н.В., Габайдуллин Р.И., Асаинов С.Т. Обустановлении степени влияния геологических факторов на метанообильность выемочных участков. // Труды университета. – 2021. – № 4(85). – С. 160–165. DOI: 10.52209/1609_1825_2021_4_160.
10. Проблемы и перспективы комплексного освоения минеральных ресурсов Восточного Донбасса. / Гл. редактор Г.Г. Матишов. – Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2005. – 190 с.
11. Труфанов В.Н., Гамов М.И., Рылов В.Г., Майский Ю.Г., Труфанов А.В. Углеводородная флюидизация ископаемых углей Восточного Донбасса. Ростов-на-Дону: РГУ, 2004. – 272 с.
12. Труфанов В.Н., Труфанов И.В. Проблема освоения ресурсов угольного метана Восточного Донбасса. // Материалы международной конференции «Проблемы геологии и освоения недр юга России». Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2006. – С. 240–242.
13. Угольная база России. Т. 1. Угольные бассейны и месторождения Европейской части России (Северный Кавказ, Восточный Донбасс, Подмосковный, Камский, Печорский бассейны, Урал). М.: Геоинформмарк, 2000. – 483 с.
14. Федотов С.М. Зоны скопления метана угольных месторождений: условия локализации, проявления, практическое значение. // Труды РАНИМИ. – 2024. – № 2(40). – С. 85–100.
15. Kursunoglu N., Ankara H. Application of statistical process control to monitor underground coal mine fires based on CO emissions. // Combustion science and technology. – 2024. – Vol. 196. No 1. – pp. 142–159. DOI: 10.1080/00102202.2022.2145558.
16. Peng S., Zuo S., Wu G., Wang C., Liao Y., Tian F.D. Title: Research status and trend of coal and gas outburst: a literature review based on VOSviewer. // International Journal of Oil, Gas and Coal Technology. – 2023. – Vol. 33. No 3. – pp. 248–281. DOI: 10.1504/IJOGCT.2023.131646.
17. Shao HE., Han F., Si J.U., Zhang JU., Li W. Inorganic thixotropic gel for controlling coal spontaneous combustion through the prevention of air leakage. // Combustion science and technology. – 2024. – Vol. 196. No. 1. – pp. 116–141. DOI: 10.1080/00102202.2022.2065202.

References

1. Agaev R.A., Vlasenko V.V., Dudlya E.E., Klyuev E.S., Pritula D.A. Mining and geological factors of methane production through surface wells by pneumohydrodynamic impact. Modern problems of mechanics. 2021. No. 44(2). pp. 127–133. (In Russ.)
2. Arkhipov I.A. Problems of monitoring greenhouse gases in open-pit coal development. Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). 2024. No. 4 (special issue 10). 44p. (In Russ.)
3. Gamov M.I., Rylov V.G. Dynamic resources of methane-rich zones of coal deposits of Eastern Donbas. In: Proc. of the Int. conf. Problems of geology and subsoil development in the Russian south. Rostov-on-Don. SSC RAS. 2006. pp. 204–206. (In Russ.)

4. Gericke B.L., Lekontsev Yu.M., Novik A.V. Air intake compensators in shaft pipelines of captive methane. Mining equipment and electromechanics. 2024. No. 3(173). pp. 22–32. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-3-22-32. (In Russ.)
5. Kolomenskaya V.G. The state and problems of development of the mineral resource base of coal of the south of Russia. In: Proc. of the Int. conf. Problems of geology and subsoil development in the Russian south. Rostov-on-Don. SSC RAS. 2006. pp. 220–223. (In Russ.)
6. Kolomensky G.Yu., Gipich L.V. Geoecological problems of technogenic coal deposits. In: Proc. of the Int. conf. Problems of geology and subsoil development in the Russian south. Rostov-on-Don. SSC RAS. 2006. pp. 365–366. (In Russ.)
7. Pinaev A.V., Pinaev P.A. Explosion, detonation in mixtures of methane-hydrogen-air, methane-hydrogen-air-coal suspension. Bulletin of the VOSTNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety. 2022. No. 3. pp. 26–38. DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.23.30.003. (In Russ.)
8. Popov V.V. Problems of prospecting, exploration and industrial development of gas-coal deposits in the south of Russia. In: Proc. of the Int. conf. Problems of geology and subsoil development in the Russian south. Rostov-on-Don. SSC RAS. 2006. pp. 168–170. (In Russ.)
9. Portnov V.S., Imanbaeva S.B., Reva N.V., Gabaidullin R.I., Asainov S.T. On establishing the degree of influence of geological factors on the methane abundance of excavated areas. Proceedings of the University. 2021. No. 4(85). pp. 160–165. DOI: 10.52209/1609_1825_2021_4_160. (In Russ.)
10. Problems and prospects for the integrated development of mineral resources of the Eastern Donbas. Ed. G.G. Matishov. Rostov-on-Don. SSC RAS. 2005. 190 p. (In Russ.)
11. Trufanov V.N., Gamov M.I., Rylov V.G., Maisky Yu.G., Trufanov A.V. Hydrocarbon fluidization of fossil coals of the Eastern Donbas. Rostov-on-Don. Rostov State University. 2004. 272 p. (In Russ.)
12. Trufanov V.N., Trufanov I.V. Problem of development of coal methane resources in Eastern Donbas. In: Proc. of the Int. conf. Problems of geology and subsoil development in the Russian south. Rostov-on-Don. SSC RAS. 2006. pp. 240–242. (In Russ.)
13. Coal base of Russia. Coal basins and deposits of the European part of Russia (North Caucasus, Eastern Donbas, Moscow region, Kamsky, Pechora basins, Ural). Moscow. Geoinformmark. 2000. 483 p. (In Russ.)
14. Fedotov S.M. Coalfield methane accumulation zones: localization conditions, manifestations, practical significance. Proceedings of RANIMI. 2024. No. 2(40). pp. 85–100. (In Russ.)
15. Kursunoglu N., Ankara H. Application of statistical process control to monitor underground coal mine fires based on CO emissions. Combustion science and technology. 2024. Vol. 196. No. 1. pp. 142–159. DOI: 10.1080/00102202.2022.2145558.
16. Peng S., Zuo S., Wu G., Wang C., Liao Y., Tian F.D. Title: Research status and trend of coal and gas outburst: a literature review based on VOSviewer. International Journal of Oil, Gas and Coal Technology. 2023. Vol. 33. No. 3. pp. 248–281. DOI: 10.1504/IJOGCT.2023.131646.
17. Shao HE., Han F., Si J.U., Zhang JU., Li W. Inorganic thixotropic gel for controlling coal spontaneous combustion through the prevention of air leakage. Combustion science and technology. 2024. Vol. 196. No. 1. pp. 116–141. DOI: 10.1080/00102202.2022.2065202.

УДК 553.982

DOI: 10.46698/VNC.2025.97.91.001

Оригинальная статья

Выделение зон повышенной трещиноватости нефтекумского природного резервуара Восточно-Безводненского месторождения с использованием программного продукта «tНавигатор»

К.И. Черненко¹, К.М. Саидова², Н.В. Еремина¹, Н.Е. Шатохин¹

¹ Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355009,
г. Ставрополь, пр. Кулакова 16/1, корп. 16, e-mail: kchernenko@ncfu.ru;

² Филиал «Газпром ВНИИГАЗ Ставрополь», Россия, 355035,
г. Ставрополь, ул. Ленина, 419

Статья поступила: 31.03.2025, доработана: 16.05.2025, принята к публикации: 20.05.2025

Резюме: Актуальность работы. Месторождения нефти и газа на территории Восточного Предкавказья, старейшего нефтегазоносного региона, находятся на стадии падающей добычи или же закончены разработкой, поэтому существует острая необходимость в приросте углеводородного потенциала. Объектом исследования являются перспективные в этом отношении трещиноватые карбонатные отложения нефтекумской свиты (нижний триас) Восточно-Безводненского месторождения, которое расположено на Востоке Ставропольского края. Залежи месторождения имеют высокую степень пространственной неоднородности, отражающейся в мозаичности зон повышенной нефтеотдачи. Установление закономерностей распространения таких зон позволит создать наиболее оптимальную цифровую геологическую модель залежей. **Целью исследования является** учет результатов выявленных закономерностей распространения зон повышенной трещиноватости продуктивного пласта при обосновании перспективных объектов доразведки и доразработки Восточно-Безводненского месторождения. **Методы исследования.** В ходе исследования был использован метод корреляционного анализа параметров добычи нефти и пространственных характеристик расположения скважин, полученных в результате структурного дешифрирования материалов дистанционного зондирования (МДЗ), а также метод моделирования зон развития улучшенных коллекторов в отечественном программном обеспечении (ПО) tНавигатор с учетом новых полученных данных. **Результаты работы.** На основании данных, полученных при обработке геолого-промыслового материала и результатов МДЗ, выявлены линейные зоны повышенной продуктивности в карбонатных отложениях нефтекумской свиты Восточно-Безводненского месторождения. Изучены и применены тектонический и литолого-фациальный критерии для учета результатов выявленных линейных зон повышенной продуктивности коллектора в цифровой геологической модели. Авторами данного исследования была построена карта латерального распределения сети трещин в ПО tНавигатор с учетом разработанного обобщенного коэффициента интенсивности трещиноватости. В результате сопоставления карт параметров, влияющих на величину накопленной добычи нефти, авторами выделены зоны, наиболее оптимальные для размещения уплотняющего бурения и проведения геолого-технических мероприятий (ГТМ).

Ключевые слова: карбонатный коллектор, моделирование трещиноватости, линеаменты, зоны повышенной продуктивности, трещинная пустотность, тренд плотности трещин, дискретная сеть трещин, прогнозная схема.

Для цитирования: Черненко К.И., Саидова К.М., Еремина Н.В., Шатохин Н.Е. Выделение зон повышенной трещиноватости нефтекумского природного резервуара Восточно-Безводненского месторождения с использованием программного продукта «tНавигатор». *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 206-218. DOI: 10.46698/VNC.2025.97.91.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.97.91.001

Original paper

Identification of increased fracturing zones of the Neftekumsk natural reservoir on the Vostochno-Bezvodnenskoye field using the software product “tNavigator”

K.I. Chernenko¹, K.M. Saidova², N.V. Yeriomina¹, N.E. Shatokhin¹

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

² Branch “Gazprom VNIIGAZ Stavropol”, 419 Lenina Str., Stavropol 355035,
Russian Federation

Received: 31.03.2025, revised: 16.05.2025, accepted: 20.05.2025

Abstract: Relevance. The oil-and-gas fields in the Eastern Fore-Caucasus, the oldest oil-and-gas region, are at the stage of declining production or have been completed, so there is an urgent need to increase the hydrocarbon potential. The object of the study is the Neftekumsk fractured carbonate formation (Lower Triassic), which is promising in this regard, on the Vostochno-Bezvodnenskoye field, which is located in the East of the Stavropol Territory. The deposits of the field have a high degree of spatial heterogeneity, reflected in the mosaic of zones of increased oil recovery. The establishment of distribution patterns of such zones will make it possible to create the most optimal digital geological model of deposits. **The aim of the study** is to take into account the results of the identified patterns of the increased fracturing zones distribution of the productive reservoir when substantiating promising exploration and development facilities for the Vostochno-Bezvodnenskoye field. **Methods.** The study used the method of correlation analysis of oil production parameters and spatial characteristics of the location of wells obtained as a result of structural decoding of remote sensing materials, as well as the method of modeling the zones of improved reservoirs in the domestic tNavigator software package, taking into account the new received data. **Results.** Based on the data obtained during the processing of geological and field material and the results of remote sensing materials, linear zones of increased productivity were identified in the Neftekumsk carbonate formation of the Vostochno-Bezvodnenskoye field. Tectonic and lithological-facies criteria have been studied and applied to account for the results of the identified linear zones of increased reservoir productivity in a digital geological model. The authors of this study have constructed a map of the lateral distribution of the fracture network in tNavigator software, taking into account the developed generalized coefficient of fracture intensity. As a result of comparing maps of parameters affecting the amount of accumulated oil production, the authors identified the zones that are most optimal for the location of infill drilling and well intervention.

Keywords: carbonate reservoir, fracture modeling, lineaments, high productivity zones, fracture voidness, trend of fracture density, discrete fracture network, predicted scheme.

For citation: Chernenko K.I., Saidova K.M., Yeriomina N.V., Shatokhin N.E. Identification of increased fracturing zones of the Neftekumsk natural reservoir on the Vostochno-Bezvodnenskoye field using the software product “tNavigator”. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 206-218. DOI: 10.46698/VNC.2025.97.91.001

Введение

Открытие и разработка в различных нефтегазоносных провинциях крупных месторождений нефти и газа в карбонатных толщах (Астраханское, Северное Хоседаю, Карачаганак, Тенгиз, Оренбургское) [Багринцева, 2003] поставили в разряд

первоочередных задач исследования их геологического, тектонического строения, а также выявление закономерностей анизотропии пустотного пространства. С этой точки зрения, старейшие нефтегазоносные регионы, в том числе Восточное Предкавказье, где до сих пор разрабатываются залежи нефти, приуроченные к рифогенным структурам в карбонатных коллекторах, остаются недоизученными.

Восточно-Безводненское месторождение относится к наиболее масштабным по геологическим запасам углеводородов на территории Ставропольского края [Сидорчук, 2024]. Залежи нефти нефтекумской свиты нижнего триаса Восточно-Безводненского месторождения (четыре залежи на Восточном поле и две залежи на Безводненском поле) представлены мощными массивными трещинно-кавернозными известняками, имеющими высокую степень пространственной неоднородности в разрезе [Черненко, 2024а; Хасанов, 2011]. В тектоническом отношении данный объект приурочен к Величаевско-Максимокумскому валу зоны Манычских прогибов. Вал интенсивно дислоцирован крупными нарушениями. По отношению к окружающим прогибам амплитуда вала составляет 700-1000 м.

По данному месторождению накоплен геолого-промысловый материал, который позволяет разработать новые критерии прогноза зон повышенной продуктивности для создания научно обоснованных рекомендаций для проведения уплотняющего бурения и ГТМ в целях повышения степени выработки запасов.

Актуальность работы

Традиционными способами, позволяющими выделять места заложения новых добывающих скважин и места проведения ГТМ с забуриванием боковых стволов, являются методы, использующие результаты традиционных аэрокосмогеологических исследований, сейсморазведки, скважинных геофизических и гидродинамических исследований, изучения керн. Большинство таких исследований для изучаемого объекта (за исключением современных скважинных геофизических исследований и изучения ориентированного керн) были проведены, но не были получены удовлетворительные результаты. Таким образом, очевидна неспособность традиционных методов и подходов выявлять участки, характеризующиеся наиболее высокими фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС) и объяснить причины наличия уникальных продуктивных характеристик некоторых участков.

На сегодняшний день проблема выделения зон повышенной трещиноватости карбонатных природных резервуаров интересует очень многие научные центры нашей страны и мира. Коллектив ученых [Мударисова, 2022] из Казанского (Приволжского) федерального университета занимается исследованием неоднородности строения карбонатных пород-коллекторов по минералогическим фазам посредством метода электронного парамагнитного резонанса, рентгенофлуоресцентного анализа и изучения стабильных изотопов.

Специалистами НК «Роснефть», Института проблем нефти и газа РАН (ИПНГ РАН) и др. проведены исследования распространения коллекторов с улучшенными коллекторскими свойствами на основе сейсмических данных, интеграции разномасштабных геологических, тектонических, литологических данных [Никулина и др., 2023], позволившие разработать критерии поиска зон повышенной продуктивности, в частности, были выявлены новые зоны (так называемые «окна»), которые характеризуются изменением волнового рисунка.

Итальянскими учеными [Ferraro et al., 2020] на основе междисциплинарных исследований тектонических нарушений в карбонатных отложениях мезозойского возраста изучена структура пор как функция механизмов деформации и диагенетических процессов и предложена концептуальная модель эволюции структуры пор для изучаемого объекта.

Ученые из Китая [Ma et al., 2024, 2023, 2022] занимаются изучением ключевых научных проблем формирования коллекторов, контролируемых разломами, скоплений углеводородов и эффективных методов добычи нефти и газа из карбонатных отложений в центральном и западном бассейнах этой страны. На основе разработанного данным коллективом ученых иерархического геологического и численного моделирования взаимодействия жидкой, твердой фаз и температурного поля была значительно повышена точность прогнозирования продуктивности нефтяных и газовых пластов.

Другая группа исследователей из Китая [Wenyang et al., 2021] с помощью сочетания геологического, статистического и экспериментального анализов данных впервые разработала количественный метод расчёта эффективности миграции углеводородов по коллекторам, осложнённым тектоническими нарушениями (разломами), на примере кембрийской формации Лунвангмяо в Сичуаньском бассейне. Результаты этих исследований показали, что системы путей миграции углеводородов по коллекторам, осложнённым тектоническими нарушениями, контролируют аккумуляцию углеводородов. Анализ данных по 17 скважинам, пробуренным с использованием этого метода, свидетельствует о высокой степени корреляции между продуктивностью скважин и эффективностью миграции углеводородов по коллекторам, а степень соответствия фактических и прогнозируемых результатов составила 83%.

Совместная научная работа иранских и немецких ученых [Iman et al., 2024] подтверждает актуальность и важность моделирования разломов на этапе разведки углеводородов и последующих исследований в процессе разработки и освоения месторождений. Так, построенные ими модели мелко- и крупномасштабных разломов, созданные на основе сейсмических и скважинных данных, совмещаются с обычной моделью разломов для создания интегрированной дискретной сети трещин (Discrete fracture network – DFN). Результаты, подтверждённые с помощью данных Formation Micro Imager (FMI), демонстрируют точность интегрированной модели DFN по сравнению с традиционными подходами на исследуемом месторождении, особенно при выявлении мелкомасштабных разломов.

В настоящей работе предлагается, кроме традиционных методов исследования, использовать новые критерии выявления зон повышенной трещиноватости нефтекумского природного резервуара Восточно-Безводненского месторождения, разработанные на основе применения статистического анализа геолого-промысловых данных, а также сопоставления направлений линий повышенной продуктивности с системой линеаментов диагонального и ортогонального простирания.

На сегодняшний день актуальным является импортозамещение в нефтегазовой промышленности, в частности, в нефтяной геологии, в том числе применение современного отечественного ПО. Одним из ряда продуктов такого программного обеспечения является технологичный и удобный продукт для моделирования месторождения – тНавигатор компании ИРМ (Руководство пользователя ..., 2004-2024, <https://rfdyn.ru/>) [Игилманов, 2022].

Материалы и методы исследований

Фактическим материалом послужили данные о продуктивности 48 эксплуатационных скважин, а также каротажный материал (1:200), структурные карты, карты эффективных нефтенасыщенных толщин и накопленных отборов залежей нефти исследуемого месторождения. Для выявления линейных зон повышенной продуктивности в карбонатных отложениях нефтекумской свиты Восточно-Безводненского месторождения был применен метод корреляционного анализа параметров добычи нефти и пространственных характеристик расположения скважин.

В ходе проведения исследования авторами для выявления анизотропии простиранения систем трещиноватости (разломов) использованы результаты структурного дешифрирования района исследования на основе системно-иерархического подхода [Никонов, 2019; Никонов, 2016, 2011; Черненко, 2024б] трех уровней генерализации: регионального, зонального и локального.

Моделирование зон развития улучшенных коллекторов осуществлялось в отечественном ПО тНавигатор (Модуль «Дизайнер Геологии, Моделей»).

Результаты работы и их обсуждение

С целью получения необходимых параметров трещиноватости авторами предложена методика построения тренда плотности трещин по данным результатов структурного дешифрирования МДЗ, продуктивных и пространственных характеристик добывающих скважин [Черненко, 2024а; Черненко, 2024б]. Моделирование сети трещин проведено в объеме природного резервуара залежей нефти нефтекумских отложений Восточно-Безводненского месторождения.

В качестве основы для построения тренда плотности распределения трещин для исследуемых залежей использован параметр в виде обобщенного коэффициента интенсивности трещиноватости $k_{обш}$, позволяющий охарактеризовать возможность попадания скважины в зону с высокими продуктивными характеристиками. Данный коэффициент является результатом перемножения коэффициента, учитывающего количество точек пересечения линейных зон повышенной продуктивности, и коэффициента близости скважин от них.

Обоснованием возможности использования коэффициента $k_{обш}$ является наибольшая теснота связи с накопленной добычей нефти ($R=0,800$, рис. 1) по сравнению с такими показателями как эффективная нефтенасыщенная толщина ($R=0,480$, [Черненко, 2024а]), абсолютная отметка кровли пласта ($R=0,040$), длительность периода эксплуатации ($R=0,370$), накопленная добыча воды ($R=0,390$), которые были рассмотрены авторами при изучении нефтекумской свиты Восточно-Безводненского месторождения. Это дает возможность осуществить моделирование и прогнозирование трещиноватости в цифровых геологических моделях.

Точки с максимальными накопленными отборами (верхнее «красное» поле) не связаны с основным объемом данных («синее поле»), и их величина обусловлена неучтенным фактором, требующим дополнительного изучения. Аномально высокие значения переменных оказывают существенное влияние на качество регрессионных моделей, поэтому они не включены в построенную статистическую зависимость. В настоящем случае аномально высокие значения не являются ошибочными, они должны стать предметом отдельного исследования.

На рисунке 2 представлена карта тренда плотности трещин, характеризующая изменения по площади залежи обобщенного коэффициента интенсивности трещиноватости. Карта отражает потенциальную интенсивность трещиноватости в пласте и распространение участков с повышенными продуктивными характеристиками [Черненко и др., 20246].

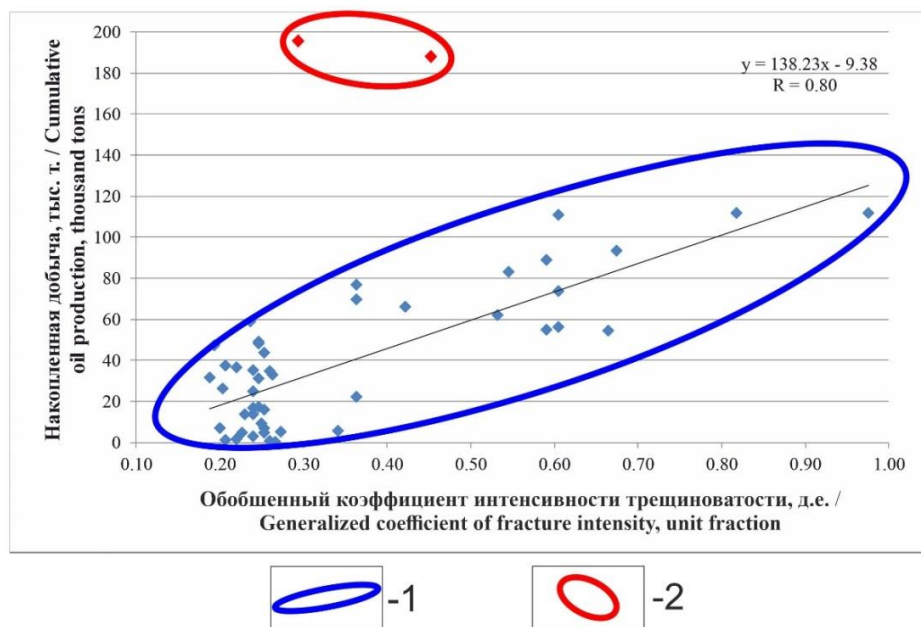


Рис. 1. График зависимости накопленной добычи нефти от обобщенного коэффициента интенсивности трещиноватости ($k_{обш} = k_{точ.перес} \times k_{апп}$) для залежей нефти нефтекумской свиты Восточно-Безводненского месторождения: 1 – «синее» поле корреляционных точек для основного объема данных; 2 – «красное» поле корреляционных точек с аномально высокими значениями накопленной добычи нефти (более 180 тыс. т) /

Fig. 1. Graph of the dependence of accumulated oil production on the generalized coefficient of fracture intensity ($k_{intersection\ point} \times k_{proximity}$) for the deposits of the Neftekumsk formation of the Vostochno-Bezvodnenskoye field: 1 – “blue” field of correlation points for the main volume of data; 2 – “red” field of correlation points with anomalously high values of accumulated oil production (more than 180 thousand tons)

Участки повышенной трещиноватости в пределах залежей располагаются на расстоянии около 750-2000 м. На построенную карту были нанесены линеаменты диагонального и ортогонального простирания, полученные в результате структурного дешифрирования МДЗ локального уровня генерализации, установлена совместимость линеаментов (потенциальных участков повышенной трещиноватости) с линиями повышенной продуктивности [Черненко, 20246]. Наибольшая величина обобщенного коэффициента интенсивности трещиноватости наблюдается в районе скважин на северо-востоке Залежи II Восточного поля исследуемого месторождения. Следует отметить, что в районе данного участка находятся скважины 210вб и 20 с наиболее высокими величинами накопленной добычи нефти (112 тыс. т).

Исходные параметры (спецификация, длина, ориентация трещин и др.) при построении дискретной сети трещин DFN приняты по аналогии с цифровыми геологическими моделями карбонатных отложений нефтяных залежей Величаевско-Колодезного и Зимне-Ставкинско-Правобережного месторождений [Черненко, 20246].

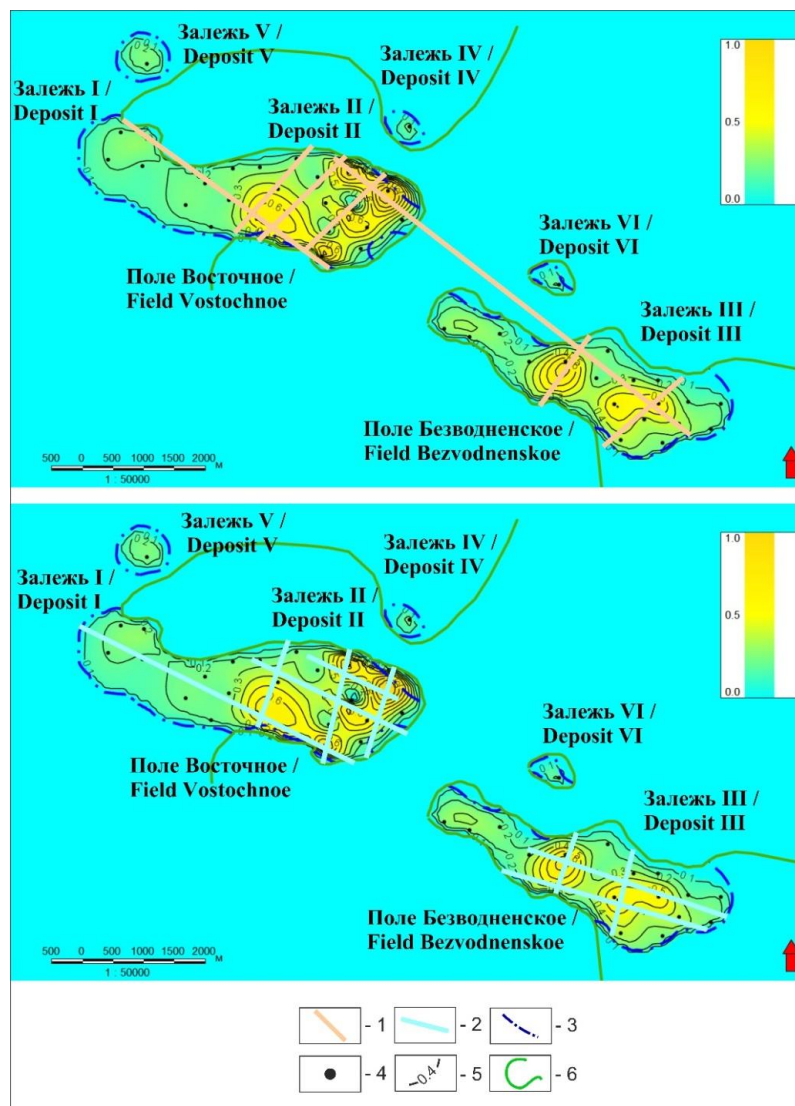


Рис. 2. Карта тренда плотности трещин залежей нефтекумской свиты Восточно-Безводненского месторождения: линейные зоны повышенной продуктивности:

1 – диагональная система; 2 – ортогональная система; 3 – контур залежи; 4 – скважина; 5 – изолинии интенсивности трещиноватости; 6 – границы замещения коллекторов /

Fig. 2. Trend map of fracture density of the deposits of the Neftekumsk formation of the Vostochno-Bezvodnenskoye field: linear zones of increased productivity: 1 – diagonal system; 2 – orthogonal system; 3 – deposit contour; 4 – well; 5 – fracture intensity isolines; 6 – reservoir replacement boundaries

Сеть трещин была построена с учетом свойства вероятности DFN (в виде 3D-свойства тренда плотности трещин) (рис. 3а). Это позволило осуществить более достоверный прогноз свойств трещиноватости и создать реалистичную трехмерную геологическую модель нефтекумских отложений залежей нефти Восточно-Безводненского месторождения.

Для включения сети трещиноватости в 3D-модель авторами было построено свойство по ремасштабированию DFN с помощью известного [Закревский, 2009; Козяев, 2019] метода Oda. Были получены следующие кубы свойств: куб трещинной пористости (Poro) и кубы проницаемости в трех направлениях (Perm_i, Perm_j, Perm_k). На рисунке 3б представлен полученный куб трещинной пористости исследуемых отложений.

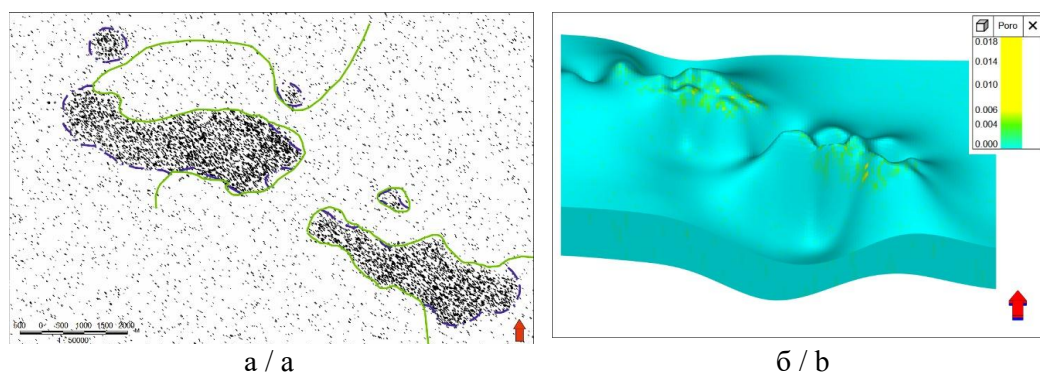


Рис. 3. Сеть трещин DFN (а), куб трещинной пористости Poro (б) объекта исследования, построенные с использованием карты тренда. Условные обозначения на рис. 2 /
 Fig. 3. Fracture network DFN (a), fracture porosity cube Poro (b) of the object of research, constructed using trend map. Symbols in fig. 2

Для учета результатов выделения линейных зон повышенной продуктивности отложений нефтекумской свиты Восточно-Безводненского месторождения при обосновании перспективных объектов доразведки и доработки изучены и применены литолого-фациальный и тектонический критерии. В таблице 1 приведены критерии прогноза зон повышенной продуктивности.

Таблица 1 / Table 1

**Критерии прогноза зон повышенной продуктивности /
 Criteria for forecasting areas of increased productivity**

Фактор/Параметр / Factor/Parameter	Показатель / Indicator	Метод выделения / Method of allocation	Зона, оптимальная для размещения уплотняющего бурения и ГТМ / Optimal zone for the placement of infill drilling and well intervention	Зона, неперспективная для размещения уплотняющего бурения и ГТМ / Unpromising zone for the placement of infill drilling and well intervention
Тектонический / Tectonic	Обобщенный коэффициент интенсивности трещиноватости, д.е. Generalized fracture intensity coefficient, unit fraction	Статистический / Statistical	0,3-0,5	0-0,3
Литолого-стратиграфический / Lithological and stratigraphic	Эффективная нефтенасыщенная толщина, м / Effective oil-saturated thickness (net pay zone), m	ГИС, керн / Logging, core	>60	<60

Тектонический / Tectonic	Абсолютная отметка кровли поверхности нефтекумской свиты, м / Absolute depth mark of the top of Neftekumsk formation, m	ГИС, керн / Logging, core	Не применяется / Does not apply
Промысловый / Field	Накопленная добыча воды, тыс.т / Accumulated water production, thousand tons	Статистический / Statistical	Не применяется / Does not apply
Промысловый / Field	Длительность работы скважин, годы / Duration of wells, years	Статистический / Statistical	Не применяется / Does not apply

Исходя из результатов статистического анализа распределения средних значений геолого-промысловых показателей, проведенного авторами, в качестве критерия для зон, оптимальных для размещения уплотняющего бурения и проведения ГТМ, приняты эффективные нефтенасыщенные толщины (литолого-стратиграфический фактор) более 60 м.

Величина критерия обобщенного коэффициента интенсивности трещиноватости (тектонический фактор) определялась исходя из величины данного показателя, характерного для скважин с максимальной продуктивностью (накопленная добыча нефти более 180 тыс. т) как в целом для основных залежей нефтекумской свиты в районе Величаевско-Максимокумского вала [Черненко, 2024б], так и для Восточно-Безводненского месторождения (рис. 1) в частности.

Далее сопоставлены методом наложения друг на друга карты параметров, имеющих наибольшую тесноту связи с накопленной добычей нефти: обобщенного коэффициента интенсивности трещиноватости (рис. 4) и эффективных нефтенасыщенных толщин (рис. 5).

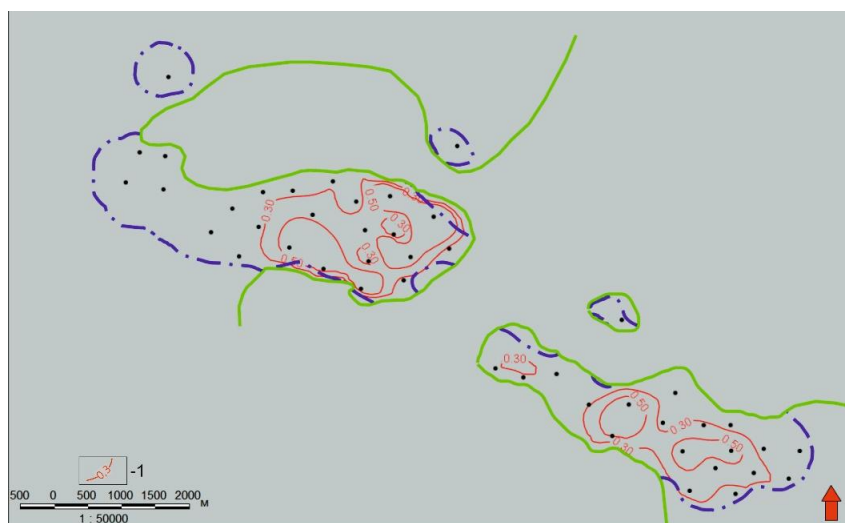


Рис. 4. Схема распространения значений обобщенного коэффициента интенсивности трещиноватости объекта исследования: 1 – изолиния, д.е.
Остальные условные обозначения на рис. 2 /

Fig. 4. Distribution scheme of the values of the generalized fracture intensity coefficient for the object of research: 1 – isoline, unit fraction. The other symbols are shown in fig. 2

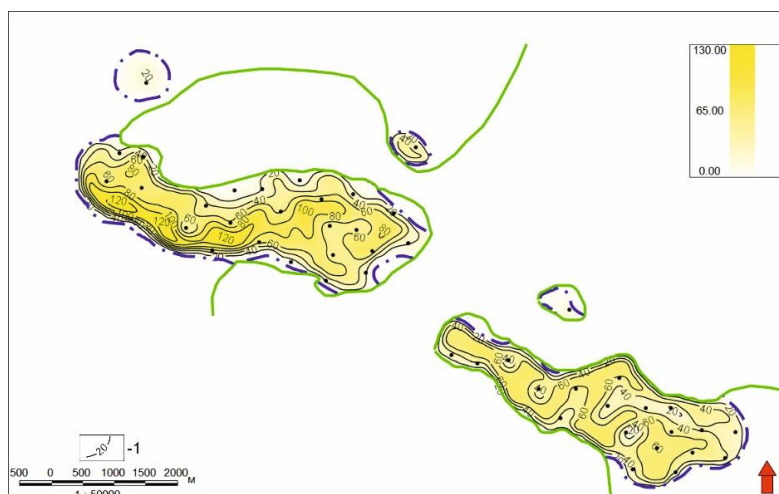


Рис. 5. Карта эффективных нефтенасыщенных толщин: 1 – изопакхита, м.
Остальные условные обозначения на рис. 2 /

Fig. 5. Map of effective oil-saturated thicknesses (net pay zone) for the object of research:
1 – isopachyte, m. The other symbols are shown in fig. 2

Зоны, наиболее оптимальные для размещения уплотняющего бурения и проведения ГТМ, представлены на прогнозной схеме улучшенных ФЕС (рис. 6). Изолинии, выраженные в процентах, показывают вероятность попадания скважины в зоны с высокой продуктивностью.

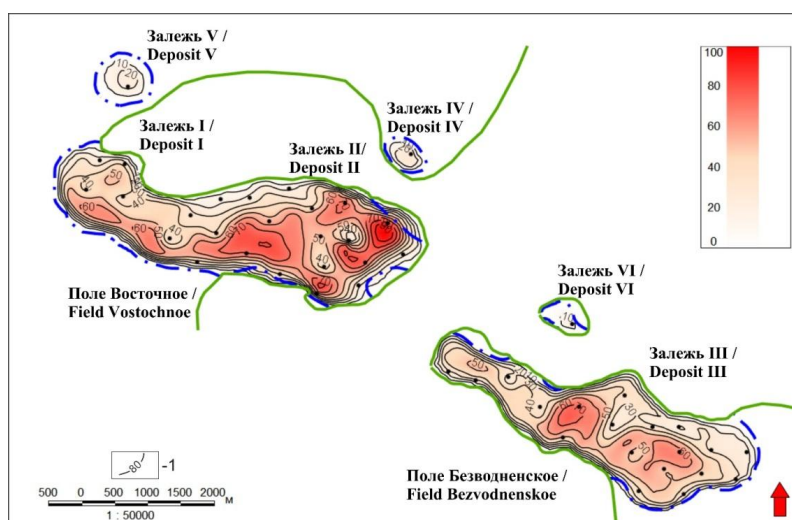


Рис. 6. Прогнозная схема улучшенных ФЕС нефтекумских карбонатных отложений залежей нефти Восточно-Безводненского месторождения:

1 – степень вероятности размещения скважины в зоне с максимальной продуктивностью, %.
Остальные условные обозначения на рис. 2 /

Fig. 6. Predicted scheme of improved reservoir properties for the Neftekumsk carbonate formation of the oil deposits for the Vostochno-Bezvodnenskoye field:

1 – the degree of probability of placing the well in the zone with maximum productivity, %.
The other symbols are shown in fig. 2

На Восточном поле выделены две зоны с высоким прогнозированным потенциалом: в центральной части и на северо-востоке. Величина прогнозного потенциала составляет от 70 % до 100 %, обобщенный коэффициент интенсивности более 0,5 д.е., эф-

фективные нефтенасыщенные толщины более 60 м. На Безводненском поле величина прогнозного потенциала значительно ниже, чем на Восточном. Максимальная величина данного показателя не превышает 70 %, преимущественно за счет более низких величин эффективных нефтенасыщенных толщин.

Таким образом, выявлены первоочередные объекты при формировании программ ГТМ.

Выводы

Комплексирование традиционных методов анализа (исследования керна, литологических данных, материалов ГИС) и нового методического подхода (сопоставление результатов линеamentного анализа, выявленных направлений зон повышенной продуктивности и геолого-промысловых данных) позволяет проводить оптимизацию процесса формирования программ ГТМ.

На примере ПО tНавигатор в данной статье показана возможность построения уточненных цифровых геологических моделей с помощью современных отечественных программных продуктов.

Результаты данных исследований позволят в дальнейшем использовать полученный алгоритм для изучения других месторождений сопредельных территорий.

Литература

1. Багринцева К.И., Дмитриевский А.Н., Бочко Р.А. Атлас карбонатных коллекторов месторождений нефти и газа Восточно-Европейской и Сибирской платформ. / Под редакцией К.И. Багринцевой. – М. 2003. – 264 с.
2. Закревский К.Е. Геологическое 3D моделирование. М.: Маска, 2009. – 376 с.
3. Игилманов Б.Б. Подсчет запасов углеводородов на основе 3D модели в симуляторе tНавигатор. Применение workflow для оптимизации работы. // Yessenov Science Journal. – 2022. – № 2(43). – С. 88–94. DOI: 10.56525/OAHL5595.
4. Козяев А.А., Щуковский Р.М., Закревский К.Е. Моделирование трещиноватости. Практикум по DFN в Petrel 2016-2019. / Под редакцией К.Е. Закревского. – М.: МАИ, 2019. – 96 с.
5. Мударисова Р.А., Волков Ю.В., Хасанова Н.М., Успенский Б.В. Характеристика карбонатных пород-коллекторов раннеказанского возраста Горского месторождения сверхвязкой нефти, изученных методом электронного парамагнитного резонанса. // Георесурсы. – 2022. – Т. 24. № 3. – С. 90–98.
6. Никонов А.И. Применение метода структурного дешифрирования с целью выявления потенциально опасных деформаций земной поверхности и зон вертикальных флюидоперетоков в пределах локальных платформенных структур (на примере Совхозного ПХГ). // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2019. – № 3(26). – С. 1–16.
7. Никонов А.И. Тектонофизические аспекты делимости земной коры и их пространственная реализация на основе линеamentного анализа. // Материалы III Всероссийского совещания и II Всероссийской молодежной школы по современной геодинамике «Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе». Иркутск: Институт земной коры Сибирского отделения РАН, 2016. – С. 99–101.
8. Никонов А.И. Тектонофизические аспекты структурного дешифрирования линеamentных систем. // Материалы Второй молодежной школы семинара «Современная тектонофизика. Методы и результаты». М.: ИФЗ РАН, 2011. – Т. 2. – С. 78–93.
9. Никулина М.Ю., Никулин Е.В., Лукьянов В.В., Плюснин А.В., Кутукова Н.М., Шустер В.Л. Перспективы поиска месторождений нефти и газа в Осинской продуктивной зоне на территории Непско-Ботубинской антеклизы в Восточной Сибири. // Нефтяное хозяй-

ство. – 2023. – № 9. – С. 85–89.

10. Сидорчук Е.А., Добрынина С.А. Геодинамическая природа размещения нефтегазовых месторождений (на примере территории Ставропольского края). // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 179–194. DOI: 10.46698/VNC.2024.90.18.014.

11. Хасанов М.А. Фильтрационно-емкостная модель пород коллекторов нижнего триаса Восточного Предкавказья. // КАРОТАЖНИК. – 2011. – № 4(202). – С. 12–19.

12. Черненко К.И. Оценка влияния тектонического фактора на формирование зон повышенной продуктивности нефтяных залежей в карбонатных отложениях нефтекумской свиты (на примере Восточно-Безводненского месторождения). // Геология и Геофизика Юга России. – 2024а. – Т. 14. № 1. – С. 114–126. DOI: 10.46698/VNC.2024.49.96.008.

13. Черненко К.И. Выявление зон повышенной продуктивности нефтяных залежей в карбонатных коллекторах нефтекумской свиты Величаевско-Максимокумского вала Восточного Предкавказья: дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 1.6.11 / Черненко Катерина Игоревна. – Ставрополь: СКФУ, 2024б. – 151 с.

14. Ferraro F., Agosta F., Prasad M., Vinciguerra S., Violay M., Giorgioni M. Pore space properties in carbonate fault rocks of peninsular Italy. // Journal of Structural Geology. – 2020. – Vol. 130. Art. No. 103913. DOI: 10.1016/j.jsg.2019.103913.

15. Iman S., Mehrdad S.M., Masoumeh K. Geological modelling of petroleum reservoir through multi-scale analysis of faults in complex media. // Journal of Asian Earth Sciences. – 2024. – Vol. 271. Art. No. 106238. DOI: 10.1016/j.jseaes.2024.106238.

16. Ma Y., Cai X., Li M., Li H., Zhu D., Qiu N., Pang X. et al. Research advances on the mechanisms of reservoir formation and hydrocarbon accumulation and the oil and gas development methods of deep and ultra-deep marine carbonates. // Petroleum Exploration and Development. – 2024. – Vol. 51. – Issue 4.

17. Ma Y., Cai X., Li H. et al. New insights into the formation mechanism of deep-ultra-deep carbonate reservoirs and the direction of oil and gas exploration in extra-deep strata. // Earth Science Frontiers. – 2023. – No. 30(6). – pp. 1–13.

18. Ma Y., Cai X., Yun L. et al. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China. // Petroleum Exploration and Development. – 2022. – No. 49(1). – pp. 1–17.

19. Wenyang W., Xiongqi P., Zhangxin C., Dongxia C., Yaping W., Xuan Y., Bing L., Wang Z., Xinwen Z., Changrong L., Qifeng W., Caijun L. Quantitative evaluation of transport efficiency of fault-reservoir composite migration pathway systems in carbonate petroliferous basins. // Energy. – 2021. – Vol. 222. Art. No. 119983. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119983.

References

1. Bagrintseva K.I., Dmitrievsky A.H., Bochko P.A. Atlas of carbonate reservoirs of oil-and-gas fields of the East European and Siberian platforms. Ed. K.I. Bagrintseva. Moscow. 2003. 264 p. (In Russ.)

2. Zakrevsky K.E. Geological 3D modeling. Moscow. Maska. 2009. 376 p. (In Russ.)

3. Igilmanov B.B. Inventory calculation hydrocarbons based on a 3D model in the tNavigator simulator. Using workflow to optimize work. Yessenov Science Journal. 2022. No. 2(43). pp. 88–94. DOI: 10.56525/OAHL5595. (In Russ.)

4. Kozyaev A.A., Shchukovsky R.M., Zakrevsky K.E. Fracture modeling. DFN Workshop at Petrel 2016-2019. Ed. Zakrevsky K.E. Moscow. MAI. 2019. 96 p. (In Russ.)

5. Mudarisova R.A., Volkov Y.V., Khasanova N.M., Uspensky B.V. Carbonate reservoir rocks characterization of the Kazanian Stage of the Gorsky ultraviscous oil field by electron paramagnetic resonance method. Georesursy. 2022. Vol. 24. No. 3. pp. 90–98. (In Russ.)

6. Nikonov A.I. The use of structural interpretation method for detecting potentially dangerous surface deformations and vertical fluid flows on local platform structures (the case of Savkhozhnoye underground gas storage). Actual Problems of Oil and Gas. 2019. Issue 3(26). pp. 1–16. (In Russ.)

7. Nikonov A.I. Tectonophysical aspects of divisibility of the Earth's crust and their spatial

implementation based on lineament analysis. In: Proc. III All-Rus. Meeting and the II All-Rus. Youth School on Modern geod. of Central Asia and dang. nat. proc. research results on a quant. basis. Irkutsk. Institute of the Earth's Crust SB RAS. 2016. pp. 99–101. (In Russ.)

8. Nikonov A.I. Tectonophysical aspects of structural decoding of lineament systems. In: Second Youth School of the seminar “Modern tectonophysics. Methods and results”. Moscow. IPE RAS. 2011. Vol. 2. pp. 78–93. (In Russ.)

9. Nikulina M.Yu., Nikulin E.V., Lukyanov V.V., Plyusnin A.V., Kutukova N.M., Shuster V.L. Prospects for searching for oil and gas deposits in the Osinsky pay zone in the territory of Nepa-Botuoba antecline of Eastern Siberia. *Oil Industry*. 2023. No. 9. pp. 85–89. (In Russ.)

10. Sidorchuk E.A., Dobrynina S.A. Geodynamic nature of the location of oil and gas fields (on the example of the Stavropol Territory). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 179–194. DOI: 10.46698/VNC.2024.90.18.014 (In Russ.)

11. Khasanov M.A. Filtration and capacity model of the reservoir rocks in Lower Trias of Eastern Caucasus bottoms. *Karotazhnik*. 2011. No. 4(202). pp. 12–19. (In Russ.)

12. Chernenko K.I. Assessment of tectonic factor influence on the formation of increased productivity zones of oil deposits in carbonate rocks of the Neftekumsk assise (on the example of the Vostochno-Bezvodnenskoye field). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 1. pp. 114–126. DOI: 10.46698/VNC.2024.49.96.008. (In Russ.)

13. Chernenko K.I. Identification of increased productivity zones of oil deposits in carbonate reservoirs of the Neftekumsk formation of the Velichaevsko-Maximokumsky swell of the Eastern Fore-Caucasus. Candidate dissertation 1.6.11. Stavropol. 2024. 151 p. (In Russ.)

14. Ferraro F., Agosta F., Prasad M., Vinciguerra S., Violay M., Giorgioni M. Pore space properties in carbonate fault rocks of peninsular Italy. *Journal of Structural Geology*. 2020. Vol. 130. Art. No. 103913. DOI: 10.1016/j.jsg.2019.103913.

15. Iman S., Mehrdad S.M., Masoumeh K. Geological modelling of petroleum reservoir through multi-scale analysis of faults in complex media. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2024. Vol. 271. Art. No. 106238. DOI: 10.1016/j.jseaes.2024.106238.

16. Ma Y., Cai X., Li M., Li H., Zhu D., Qiu N., Pang X. et al. Research advances on the mechanisms of reservoir formation and hydrocarbon accumulation and the oil and gas development methods of deep and ultra-deep marine carbonates. *Petroleum Exploration and Development*. 2024. Vol. 51. Issue 4.

17. Ma Y., Cai X., Li H. et al. New insights into the formation mechanism of deep-ultra-deep carbonate reservoirs and the direction of oil and gas exploration in extra-deep strata. *Earth Science Frontiers*. 2023. No. 30(6). pp. 1–13.

18. Ma Y., Cai X., Yun L. et al. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*. 2022. No. 49(1). pp. 1–17.

19. Wenyang W., Xiongqi P., Zhangxin C., Dongxia C., Yaping W., Xuan Y., Bing L., Wang Z., Xinwen Z., Changrong L., Qifeng W., Caijun L. Quantitative evaluation of transport efficiency of fault-reservoir composite migration pathway systems in carbonate petroliferous basins. *Energy*. 2021. Vol. 222. Art. No. 119983. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119983.

УДК 556.114.6

DOI: 10.46698/VNC.2025.46.62.001

Оригинальная статья

Природное и антропогенное загрязнение микроэлементами верховий бассейна р. Ардон

Н.В. Реутова^{ORCID}, Т.В. Реутова^{ORCID}, Ф.Р. Дреева^{ORCID}

Кабардино-Балкарский научный центр РАН, Россия, 360000, г. Нальчик,
ул. Балкарова, 2, e-mail: reutova371@mail.ru

Статья поступила: 25.03.2025, доработана: 27.05.2025, принята к публикации: 02.06.2025

Резюме: Актуальность работы. Проблема загрязнения поверхностных вод потенциально токсичными элементами в районах расположения предприятий по добыче и обогащению полиметаллических руд особенно актуальна для горных регионов, т.к. воды в этих регионах имеют низкую способность к самоочищению. При этом ввиду сложности геологического строения молодого горного сооружения проблема природного загрязнения вод заслуживает не меньшего внимания. **Целью** данной работы является сравнительный анализ природного и антропогенного загрязнения поверхностных вод верховий бассейна р. Ардон после рекультивации хвостохранилища. **Материалы и методы.** В районе исследования пробы отбирали в 41 пункте. Отбор производили в период летнего паводка в 2022-2024 годах. В поверхностных водах изучали содержание 14 потенциально токсичных элементов в растворенной форме. Это Ag, Al, As, Cd, Cr, Cu, F, Li⁺, Mn, Mo, Ni, Pb, Sr²⁺, Zn. Все пробы фильтровали через мембранные фильтры с размером пор 0,45 мкм. Концентрации фтора, лития и стронция определяли с использованием метода капиллярного электрофореза на приборе «Капель 104Т». Содержание остальных элементов определяли с использованием атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) на приборе МГА-915. **Результаты работы.** После проведения рекультивации Унальского хвостохранилища в 2019 году в поверхностных водах верховий бассейна р. Ардон, расположенных ниже хвостохранилища, снизились концентрации хрома, молибдена, алюминия, мышьяка, лития, никеля и свинца. В настоящее время природное загрязнение поверхностных вод алюминием, мышьяком, стронцием и литием сопоставимо с антропогенным, связанным с наличием ранее разрабатывавшегося свинцово-цинкового месторождения. В настоящее время обогащение поверхностных вод бассейна р. Ардон алюминием и литием связано в основном с вулканической деятельностью, и в меньшей степени с влиянием хвостохранилища. Не выявлено превышения ПДК для питьевой воды в исследуемых водотоках. Единственным исключением является питьевая вода пос. Садон, в которой ПДК по кадмию превышена в 4 раза, по литию и мышьяку в 2 раза. Кроме того, питьевая вода этого поселка имеет повышенные концентрации цинка и молибдена. Для данного поселка настоятельно рекомендуется изменить источник водоснабжения.

Ключевые слова: поверхностные воды, потенциально токсичные элементы, рекультивация, Садонский свинцово-цинковый комбинат, река Ардон.

Для цитирования: Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р. Природное и антропогенное загрязнение микроэлементами верховий бассейна р. Ардон. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 219-230. DOI: 10.46698/VNC.2025.46.62.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.46.62.001

Original paper

Natural and anthropogenic microelement pollution of the upper reaches of the Ardon River basin

N.V. Reutova^{ORCID}, T.V. Reutova^{ORCID}, F.R. Dreeva^{ORCID}

Kabardino-Balkar Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 2 Balkarova Str., Nalchik
360000, Russian Federation, e-mail: reutova371@mail.ru

Received: 25.03.2025, revised: 27.05.2025, accepted: 02.06.2025

Abstract: Relevance. The problem of surface waters contamination with potentially toxic elements in areas where polymetallic ore mining and processing enterprises are located is especially relevant for mountainous regions, since waters in these regions have a low ability to self-purify. Due to the complexity of the geological structure of the young mining facility, the problem of natural water pollution deserves attention. **The aim** of this work is a comparative analysis of natural and anthropogenic surface waters pollution of the upper reaches of the Ardon River basin after the remediation of the tailings dam. **Materials and methods.** Samples were taken at 41 sampling points in the study area. The sampling was carried out during the summer flood in 2022-2024. The content of 14 potentially toxic elements in dissolved form was studied in surface waters. These are Ag, Al, As, Cd, Cr, Cu, F, Li⁺, Mn, Mo, Ni, Pb, Sr²⁺, Zn. All samples were filtered through membrane filters with a pore size of 0.45 microns. The concentrations of fluorine, lithium, and strontium were determined using capillary electrophoresis. The content of other elements was determined using atomic absorption spectrometry (AAS). **Results.** Concentrations of chromium, molybdenum, aluminum, arsenic, lithium, nickel and lead decreased in the surface waters of the upper reaches of the Ardon River basin after remediation of the Unal tailings dam in 2019. Currently, natural contamination of surface waters with aluminum, arsenic, strontium, and lithium is comparable to anthropogenic pollution associated with the presence of a lead-zinc deposit that was previously developed. At the present time, the enrichment of the surface waters of the Ardon River basin with aluminum and lithium is mainly due to volcanic activity, and to a lesser extent to the influence of the tailings dam. There was no excess of the maximum permissible concentration for drinking water in the studied watercourses. The only exception is the drinking water of the industrial settlement Sadon, in which the maximum permissible concentration for cadmium is exceeded by 4 times, for lithium and arsenic by 2 times. In addition, the drinking water of this settlement has high concentrations of zinc and molybdenum. It is strongly recommended to change the water supply source for this settlement.

Keywords: surface waters, potentially toxic elements, remediation, Sadon lead-zinc factory, Ardon River.

For citation: Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R. Natural and anthropogenic microelement pollution of the upper reaches of the Ardon River basin. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 219-230. DOI: 10.46698/VNC.2025.46.62.001

Введение

Проблема загрязнения поверхностных вод потенциально токсичными элементами в районах расположения предприятий по добыче и обогащению полиметаллических руд особенно актуальна для горных регионов. Поверхностные воды в этих районах имеют низкую способность к самоочищению из-за низких температур, высокой скорости течения и слабого развития биоты. Одним из таких районов является месторождение свинцово-цинковых руд Садонского горнорудного района (Северная Осетия-Алания), которое расположено в верховьях бассейна р. Ардон. В нём действовало семь рудников, руда из которых поставлялась на Мизурскую горно-обогатительную фабрику, открытую в 1929 году [Гурбанов и др., 2012]. Вплоть

В поверхностных водах изучали содержание 14 элементов в растворенной форме. Это Ag, Al, As, Cd, Cr, Cu, F⁻, Li⁺, Mn, Mo, Ni, Pb, Sr²⁺, Zn. Концентрации фтора, лития и стронция определяли методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель 104Т». Содержание остальных элементов определяли с использованием атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) на приборе МГА-915.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 приведены минимальные, максимальные и средние концентрации потенциально токсичных элементов в поверхностных водах бассейнов трех рек (Закка, Лядон, Мамихдон), охватывающих водосбор зоны формирования р. Ардон до Зарамагского водохранилища и бассейна р. Садон, подверженного антропогенному (постиндустриальному) загрязнению, а также в самой р. Ардон и устьях трех ее притоков (Цеядон, Баддон, Архондон). По руслу р. Ардон три створа расположены до впадения р. Садон, в бассейне которой находится свинцово-цинковое месторождение. Створ на 66,3 км расположен ниже Унальского хвостохранилища. В 2019 году была произведена рекультивация этого хвостохранилища и к моменту проведения данных исследований «защитного» озера уже не было. Хвостохранилище представляло собой сухой луг, покрытый травянистой растительностью.

В таблице 1 не приведены данные по ряду элементов, поскольку их концентрации были очень низкими, меньше кларковых значений, и варьировали незначительно. Так концентрации серебра колебались в пределах 0,008-0,06 мкг/дм³. Содержание кадмия варьировало в пределах 0,02-0,03 мкг/дм³. Только в ручье из штольни и в питьевой воде пос. Садон концентрации кадмия составили 3,7 и 3,8 мкг/дм³ соответственно. Если сравнить наши данные по кадмию с имеющимися в литературе, то они хорошо согласуются. Так по данным [Гурбанов и др., 2012; 2020] концентрации кадмия в воде р. Ардон колебались в пределах 0,08-0,12 мкг/дм³. По данным Д.Н. Чигоевой с соавторами [2018] концентрации кадмия в ручье из штольни составили 85 мкг/дм³, что значительно выше наших результатов. Но эти исследования проводились в 2016 году, и определялось валовое содержание элементов, поскольку фильтрацию проб не проводили.

Концентрации хрома варьировали от 0,2 до 0,5 мкг/дм³, что более чем в 2 раза ниже кларковых значений (1 мкг/дм³). Ни одного створа с повышенным содержанием хрома мы не выявили. Если сравнить наши результаты с имеющимися литературными данными, то в работе [Гурбанов и др., 2020] содержание хрома варьировало от 0,8 до 6,1 мкг/дм³ в водах р. Садон и р. Ардон ниже ССЦК. Таким образом, содержание хрома в поверхностных водах после проведенной рекультивации снизилось.

Концентрации марганца, в основном, варьировали в пределах 0,6-2,0 мкг/дм³, что значительно ниже кларка (10 мкг/дм³). Более высоким содержанием отличались воды р. Садон (7,25 мкг/дм³), ее притока р. Ходдон (5,98 мкг/дм³) и в створе, расположенном на р. Ардон на 43-м километре её течения (8,97 мкг/дм³). Все эти пункты находятся в зоне расположения ССЦК.

Таблица 1 / Table 1

Содержание микроэлементов мкг/дм³ в поверхностных водах бассейна реки Ардон (мин.-макс./средн.) /
The content of trace elements µg/dm³ in the surface waters of the Ardon River basin ((min.-max./mean)

	Al	As	Cu	F ⁻	Li ⁺	Sr ⁺	Ni	Pb	Zn
Бассейны рек / River basins									
Закка / Zakka	11,3-86,5 23,6	0,1-1,41 0,6	0,4-2,6 1,1	70,1-290,5 146,7	5,9-23,7 13,7	154,9-514,0 316,1	<ПО/РО-0,3 0,2	<ПО/РО-1,0 0,3	11,4-84,5 56,0
Лядон / Lyadon	9,0-420,2 86,0	0,7-13,0 5,4	0,4-3,1 1,7	38,6-188,2 116,4	4,0-15,7 11,0	65,9-270,4 137,0	0,3-1,44 0,7	0,1-0,8 0,4	31,0-90,2 59,9
Мамихдон / Mamichdon	13,8-43,4 20,5	<ПО/РО-0,7 0,3	0,5-1,5 0,8	22,3-154,8 99,3	1,8-18,7 9,3	88,5-561,4 327,0	0,1-0,5 0,3	0,3-0,6 0,4	37,0-66,4 53,46
Садон / Sadon	12,6-84,8 48,8	0,1-4,62 2,21	0,6-2,2 1,9**	128,5-259,8 264,8**	<ПО/РО-21,1 7,8**	37,7-252,6 133,3**	0,1-1,3 0,7	0,5-1,2 0,7	48,6-83,3 69,4**
Реки (расстояние от истока, км) [коэффициент вариации] / Rivers (distance from source, km) [coefficient of variation]									
Ардон/Мамихдон (18,4)* / Ardon/ Mamichdon (18,4)*	43,4(3,56)	0,7(0,08)	1,53(0,00)	86,4[0,027]	6,3[0,045]	270,1[0,07]	0,5(0,01)	0,6(0,07)	56,5(7,48)
Ардон/ Ardon (26,9)	14,5[0,58]	0,9[0,77]	1,1(0,82)	179,9 [0,15]	17,841[0,14]	267,9[0,13]	0,25[0,41]	0,6[0,22]	43,58[0,87]
Цейдон/ Tseyadon (13,5)	20,1[0,37]	0,9[0,22]	1,2[0,80]	77,6[0,33]	0,5[1,73]	41,2[0,37]	0,5[0,29]	0,6[0,06]	35,2[0,53]
Ардон/ Ardon (42,4)*	69,7(0,09)	1,0(0,08)	30,8(1,08)	103,0[0,096]	6,9[0,21]	179,9[0,0011]	0,5(0,00)	1,2(0,07)	<ПО/РО
Баддон/ Baddon (9,5)*	23,7(1,33)	0,3(0,03)	1,3(0,10)	98,6[0,19]	<ПО	36,8[0,021]	0,9(0,22)	0,2(0,03)	73,2(7,75)
Архондон / Archondon (13,7)*	20,5(0,05)	2,76(0,09)	1,6(0,33)	16,0[0,50]	1,5[0]	46,2[0,063]	0,6(0,08)	0,3(0,03)	65,1(7,34)
Ардон/ Ardon (66,3)	76,2[1,07]	5,6(0,39)	2,1[0,82]	179,9[0,15]	17,8[0,14]	267,9[0,13]	0,45[0,88]	0,6[0,39]	30,0[0,93]
ПДК _{питьев.} / MAC _{drink}	500	10	1000	1500	30	7000	100	30	50
Кларки речных вод / Clarks of river waters	160	2	7	100	2,5	50	2,5	1	20

Примечание / Note: <ПО – ниже предела определения / РО – below the limit of determination

* – пробы отбирали однократно / sampled once

** – без учета вод из штолен / excluding water from adits

Но и эти концентрации не превышают кларковых значений. И только в ручье из штольни концентрации марганца достигали 46 мкг/дм^3 . Полученные нами результаты хорошо согласуются с литературными данными [Гурбанов и др., 2012]. Но в исследованиях тех же авторов, проведенных в 2015 году [Гурбанов и др., 2018], приведенные концентрации марганца были в целом на порядок выше.

Концентрации молибдена в 18 пунктах из 41 были ниже предела определения. Только в питьевой воде пос. Садон и в ручье из штольни рядом с этим поселком концентрации составили 2,1 и $8,5 \text{ мкг/дм}^3$ соответственно, а в воде защитного озера в последний год его существования (2018) содержалось $257,1 \text{ мкг/дм}^3$. По данным работы [Гурбанов и др., 2012] концентрации молибдена в водах «защитного» озера достигали 250 мкг/дм^3 . Следовательно, отходы Мизурской горно-обогатительной фабрики были обогащены молибденом. Но к моменту наших исследований в результате проведенной рекультивации озера уже не было, и уровень загрязнения вод реки Ардон ниже хвостохранилища значительно снизился.

Как видно из таблицы 1, концентрации алюминия не превышали кларковых значений. Только в бассейне р. Лядон в двух притоках, берущих своё начало со склонов вулканической постройки Тепли, концентрации алюминия достигали 217 и 420 мкг/дм^3 , что хорошо согласуется с тем фактом, что поступление алюминия в поверхностные воды связано с вулканической деятельностью [Реутова и др., 2024]. В целом, более низкие концентрации алюминия в поверхностных водах Казбекского вулканического района по сравнению с Эльбрусским вулканическим центром могут быть связаны с иммобилизацией алюминия на геохимическом барьере из-за широкораспространенных карбонатных осадочных пород [Савенко, Савенко, 2018].

В работе А.Г. Гурбанова [Гурбанов и др., 2018] приведены концентрации алюминия для водных объектов Унальского хвостохранилища, где они составляли 3194–5775 мкг/дм^3 . Ниже хвостохранилища вниз по течению р. Ардон они колебались от 2592 до 2336 мкг/дм^3 . По нашим данным в воде р. Ардон ниже хвостохранилища концентрация алюминия составила $76,2 \text{ мкг/дм}^3$. Таким образом, в настоящее время природное загрязнение вод верховий бассейна р. Ардон (бассейн р. Лядон), связанное с наличием вулканов, выше, чем антропогенное, обусловленное наличием ныне не действующего ССЦК.

Мы обращаем особое внимание на изучение уровня загрязнения мышьяком поверхностных вод в связи с множественностью источников его поступления и значительной токсичностью для живых организмов [Sasireka et al., 2024; Mohd et al., 2025]. Концентрации мышьяка в поверхностных водах исследуемого района были значительно ниже кларковых значений. Только в пяти пунктах наблюдений они оказались значительно выше. Это в первую очередь р. Лядон, берущая начало с южных склонов г. Тепли (рис. 1), где концентрации от верхнего створа до устья составляли 0,9–1,3. Для р. Архондон, берущей свое начало с северных склонов горного массива Тепли, характерно относительно повышенное содержание As (табл. 1). В районе ССЦК повышенные концентрации мышьяка, сравнимые с Архондоном, выявлены в ручье из штольни и в питьевой воде пос. Садон. Таким образом, и в случае загрязнения мышьяком поверхностных вод верховий бассейна р. Ардон в настоящее время природное загрязнение превышает антропогенное. Но в основном в исследуемом районе концентрации мышьяка очень низкие.

По данным работы [Гурбанов и др., 2018] концентрации мышьяка в р. Ардон в районе пос. Тамиск составили 52 мкг/дм^3 , а в районе г. Алагир 107166 мкг/дм^3 . По

нашим данным таких необычайно высоких концентраций в настоящее время нет.

Содержание меди в поверхностных водах исследуемого района низкое и превышает кларковые значения только в трех пробах бассейна р. Садон. Это р. Ходдон ($7,71 \text{ мкг/дм}^3$), ручей из штольни ($17,3 \text{ мкг/дм}^3$) и р. Ардон до впадения р. Садон ($30,8 \text{ мкг/дм}^3$). Полученные нами данные по концентрациям меди хорошо совпадают с имеющимися в литературе [Гурбанов и др., 2012; 2018; Дзодзикова, 2017]. Изменений концентраций меди в поверхностных водах данного региона, связанных с рекультивацией хвостохранилища, не выявлено.

Средние концентрации фтора в поверхностных водах бассейнов рек в самых верховьях р. Ардон превышают или равны кларковым значениям. Причем, наибольших значений они достигают в районе ССЦК, следовательно, объясняются исключительно антропогенным влиянием. В питьевой воде пос. Садон и ручье из штольни они составляют $792,9$ и $738,5 \text{ мкг/дм}^3$ соответственно. Ни в одном водотоке концентрации фтора не превышали ПДК для питьевой воды. Но, с другой стороны, в поверхностных водах исследуемого региона содержание этого элемента не достигает норм физиологической полноценности, которые составляют $0,5\text{--}1,5 \text{ мг/дм}^3$. Сходная картина наблюдается и в соседнем регионе Центрального Кавказа. В бассейне р. Баксан (левый приток второго порядка р. Терек) в районе расположения Тырныаузского вольфрамово-молибденового месторождения концентрации фтора также повышены в водотоках отвалов и хвостохранилищ до $6\text{--}9 \text{ мг/дм}^3$ [Реутова и др., 2020].

Однозначный индикатор проявления магматизма это повышение концентраций ионов лития. В исследуемом районе зоны с повышенным и высоким содержанием Li^+ приурочены к вулканическим центрам. Поверхностные воды верховий бассейна р. Ардон значительно обогащены литием. Только в устьях трех притоков, расположенных ниже ССЦК (р. Цеядон, Баддон и Архондон), его концентрации были ниже кларков. Во всех остальных водотоках концентрации лития в $2\text{--}9$ раз превышали кларковые значения. В бассейнах рек Закка, Лядон и Мамихдон это загрязнение носит природный характер, а для р. Садон характерно антропогенное загрязнение. Особенно высокое загрязнение этим элементом отмечено в питьевой воде пос. Садон и ручье из штольни ($68,2$ и $66,6 \text{ мкг/дм}^3$ соответственно). А.Г. Гурбанов с соавторами для района расположения ССЦК и его окрестностей приводят концентрации лития на три порядка превышающие наши данные. Так, в частности, для р. Цеядон 5602 мкг/дм^3 (187 ПДК), а для р. Садон 4284 мкг/дм^3 . Если для р. Садон значительное снижение загрязнения литием можно объяснить результатом рекультивации, то на р. Цеядон и Ардон такой высокий уровень загрязнения, выявленный вышеуказанными авторами, вызывает сомнения.

Поверхностные воды верховий р. Ардон значительно обогащены стронцием. Концентрации в пределах кларковых значений выявлены только в устьях трех притоков – р. Цеядон, р. Архондон и р. Баддон. Наиболее загрязнены стронцием воды бассейнов рек Мамихдон и Закка. В районе расположения ССЦК сопоставимые концентрации выявлены в питьевой воде пос. Садон и ручье из штольни (529 и 515 мкг/дм^3 соответственно). Таким образом, в настоящее время уровни природного и антропогенного загрязнения поверхностных вод стронцием в верховьях бассейна р. Ардон сопоставимы. Полученные данные вполне соответствуют результатам обследований поверхностных вод в районе расположения ССЦК 2010 и 2015 годов, приведенных в работах [Гурбанов и др., 2012; 2018].

Во всех водных объектах исследуемого региона концентрации никеля были более чем в два раза ниже кларковых значений (табл. 1). В ранее проведенных исследованиях 2010 и 2015 годов [Гурбанов и др., 2012; 2018] приведены значительно более высокие концентрации. Так, в р. Ардон в 2010 году концентрации варьировали от 2 до 4 мкг/дм³, а в 2015 – от 2 до 6 мкг/дм³. В р. Садон по данным этих авторов концентрации никеля составляли 1,3 мкг/дм³. Таким образом, концентрации никеля за 10-летний промежуток времени заметно снизились за счет рекультивации хвостохранилища.

Концентрации свинца в поверхностных водах также не превышали кларковых значений. Только в воде из штольни они составили 5,8 мкг/дм³, и были немного повышены до 1-2 мкг/дм³ в р. Садон и питьевой воде пос. Садон. По литературным данным в 2012 и 2015 годах концентрации этого элемента были значительно выше. Так, в р. Архондон они составили 15,4 мкг/дм³, в р. Ардон в районе пос. Тамиск – 13,5 мкг/дм³ [Гурбанов и др., 2018]. По данным работы [Чигоева и др., 2018] в ручье из штольни концентрация свинца составила 42,3 мкг/дм³, в р. Ардон выше ССЦК 6,3 мкг/дм³ и в р. Ардон ниже ССЦК – 3400 мкг/дм³, что вызывает сомнения, даже если предположить, что определяли валовое содержание Pb, а не растворимую форму. Но, тем не менее, после проведенной рекультивации хвостохранилища концентрации свинца в поверхностных водах снизились.

Воды верховий р. Ардон обогащены цинком. Во всех створах они превышали кларковые значения в 1,5-4,5 раза. Единственным исключением является р. Ардон на 43-м километре её течения. В ручье из штольни концентрации цинка составили 435,1 мкг/дм³, а в питьевой воде пос. Садон 363,2 мкг/дм³. По данным работы [Гурбанов и др., 2020] концентрации цинка в воде «защитного» озера и дренажной воде колебались в пределах 1500 мкг/дм³, а в водотоках выше ССЦК хорошо согласуются с нашими данными.

Мы приводим сравнительную таблицу по уровню загрязнения поверхностных вод бассейна р. Ардон до и после проведения рекультивации хвостохранилища. Данные до рекультивации приведены по литературным источникам [Гурбанов и др., 2012; 2020] без учета вод дренажного озера и пульпопровода поскольку к 2022 году его уже не было.

Таблица 2 / Table 2

Содержание микроэлементов мкг/дм³ в поверхностных водах бассейна реки Ардон в районе расположения ССЦК /

The content of trace elements µg/dm³ in the surface waters of the Ardon River basin in the area of the Sadonsky Lead-Zinc Combine

ПТЭ/PTE	2012-2015*	2022-2024	ПТЭ/PTE	2012-2015*	2022-2024
Al	2336-2592	12,6-84,8	Mn	2,1-8,7	6,0-9,0
As	1,3-52,7	0,9-5,6	Mo	247-473	2,1-8,5
Cd	0,08-0,12	0,02-0,03	Ni	1,9-6,1	0,1-0,9
Cr	0,8-6,1	0,2-0,5	Pb	1,2-13,5	0,6-1,2
Cu	2,6-10,5	1,1-2,1	Sr	31,1-275,0	41,2-267,9
Li ⁺	4284-5602	0,5-66,7	Zn	4,1-32,8	30,0-69,4

Примечание: * – Гурбанов и др., 2012; 2020. / Note: * – Gurbanov et al., 2012; 2020.

Выводы

Впервые проведено изучение уровня природного загрязнения в районе верховий бассейна р. Ардон, связанного с наличием природных геохимических аномалий и влиянием современного вулканизма и проведена оценка эффективности рекультивации Унальского хвостохранилища. В результате проведенных исследований выявлено:

- в поверхностных водах бассейна р. Ардон ниже хвостохранилища после рекультивации снизились концентрации хрома, молибдена, алюминия, мышьяка, лития, никеля и свинца;

- в настоящее время природное загрязнение поверхностных вод алюминием, мышьяком, стронцием и литием сопоставимо с антропогенным, связанным с наличием ранее разрабатывавшегося свинцово-цинкового месторождения. Обогащение поверхностных вод бассейна р. Ардон алюминием и литием связано в основном с вулканической деятельностью, и в меньшей степени с влиянием хвостохранилища;

- не выявлено превышения ПДК для питьевой воды в исследуемых водотоках. Единственным исключением является питьевая вода пос. Садон, в которой ПДК по кадмию превышена в 4 раза, по литию в 2 раза. Кроме того, питьевая вода этого поселка имеет повышенные концентрации цинка, мышьяка и молибдена. Для данного поселка настоятельно рекомендуется изменить источник водоснабжения.

Литература

1. Белюченко И.С. Методы рекультивации нарушенных земель. // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2019. – Т. 15. № 1. – С. 4–13.
2. Валиев Н.Г., Голик В.И., Лебзин М.С. Инертность влияния стоков Тырныаузского вольфрамо-молибденового комбината на гидросистемы Северного Кавказа. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2025. – № 1-1. – С. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_5.
3. Голубев Ф.В., Ермаков В.В. Геохимическая экология растений в условиях полиметаллических биогеохимических провинций в бассейне реки Ардон (Северная Осетия). // Труды XII Международной биогеохимической школы «Фундаментальные основы биогеохимических технологий и перспективы их применения в охране природы, сельском хозяйстве и медицине», посвященной 175-летию со дня рождения В.В. Докучаева. Тула: Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, 2021. – С. 429–433.
4. Гурбанов А.Г., Лексин А.Б., Газеев В.М. и др. Экологическое состояние вод реки Ардон и оценка последствий их загрязняющего воздействия на воды реки Терек – объекта рыбохозяйственного значения I категории. // Вестник Владикавказского научного центра. – 2020. – Т. 20. № 1. – С. 50–61. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.56948.
5. Гурбанов А.Г., Лолаев А.Б., Лексин А.Б. и др. Основные источники загрязнения вод р. Ардон, его степень и масштабы проявления, оцененные по результатам геохимического изучения проб воды из контрольных пунктов (PCO-A). // Вестник Владикавказского научного центра. – 2018. – Т. 18. № 3. – С. 40–50.
6. Гурбанов А.Г., Шаззо Ю.К., Лексин А.Б. и др. Промышленные отходы Мизурской горно-обогатительной фабрики Садонского свинцово-цинкового комбината (геохимические особенности, оценка их воздействия на экологическую обстановку прилегающих территорий (почвы и воду р. Ардон) Республика Северная Осетия-Алания). // Вестник Владикавказского научного центра. – 2012. – Т. 12. № 4. – С. 27–40.
7. Дзодзикова М.Э. Ретроспективный анализ химического состояния вод в руслах рек Ардон и Фиагдон в Северной Осетии. // Материалы II Международной научной конференции «Развитие регионов в XXI веке». / Под общ. редакцией А.У. Огоева. – Владикавказ: СОГУ им. К.Л. Хетагурова, 2017. – С. 354–356.

8. Жинжакова Л.З., Чередник Е.А. Многолетние наблюдения за содержанием микропримесей в водах ледниковой реки Ардон за период 2005-2018гг. // *Modern Science*. – 2019. – № 4-2. – С. 24–29.
9. Зверева В.П., Фролов К.Р., Лысенко А.И. Влияние техногенных вод на реку Рудную Дальневосточного региона. // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. № 10. – С. 49–58. DOI: 10.18799/24131830/2022/10/3715.
10. Реутова Т.В., Дреева Ф.Р., Реутова Н.В., Хутуев А.М. Содержание фторидов в речных водах Западной части бассейна реки Терек. // Коллективная монография по материалам X Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа». Грозный: Формат, 2020. – С. 506–512.
11. Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р. Сравнительная характеристика содержания алюминия и мышьяка в поверхностных водах Эльбрусского и Казбекского вулканических центров. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 231–243. DOI: 10.46698/VNC.2024.80.62.018.
12. Савенко А.В., Савенко В.С. Имобилизация алюминия на карбонатном геохимическом барьере. // *Наукоемкие технологии*. – 2018 – Т. 19. № 1. – С. 44–47.
13. Сариев А.Х., Чербакова Н.Н., Терентьева Н.Ю. Оценка возможности биологической рекультивации хвостохранилищ на Енисейском Севере. // *Экология и промышленность России*. – 2021. – Т. 25. № 5. – С. 39–45. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-5-39-45.
14. Чигоева Д.Н., Каманина И.З., Каплина С.П. Содержание тяжелых металлов в водотоках в районе Унальского хвостохранилища и реки Ардон. // *Юг России: экология, развитие*. – 2018. – Т. 13. № 2. – С. 113–122. DOI: 10.18470/1992-1098-2018-2-113-122.
15. Chowdhury S.R., Yanful E.K., Pratt A.R. Recycling of nickel smelter slag for arsenic remediation – an experimental study. // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2014. – Vol. 21. – pp. 10096–10107.
16. Kacmaz H. Assessment of heavy metal contamination in natural waters of Dereli, Giresun: an area containing mineral deposits in northeastern Turkey. // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2020. – Vol. 192. No. 2. – pp. 1–12. DOI: 10.1007/s10661-019-8057-0.
17. Mohd S., Fazil Q., Salman A. et al. A Comprehensive review on arsenic contamination in groundwater: sources, detection, mitigation strategies and cost analysis. // *Environmental Research*. – 2025. – Vol. 265. Art. No. 120457. DOI: 10.1016/j.envres.2024.120457.
18. Sasireka R., Vinoth R., Abhishek Sh., Sugumari V., Madheswaran M. Arsenic and environment: a systematic review on arsenic sources, uptake mechanism in plants, health hazards and remediation strategies. // *Topics in Catalysis*. – 2024. – Vol. 67. – pp. 1–17. DOI: 10.1007/s11244-023-01901-9.
19. Simion A.F., Drebenstedt C., Lazar M. The Influence of tailings storage facilities in the eastern part of Jiu valley on the water quality. // *Mining Science and Technology (Russia)*. – 2019. – Vol. 4. No. 4. – pp. 292–301. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-4-292-301.
20. Zhang L., Liu W., Liu S. et al. Revegetation of a barren rare earth mine using native plant species in reciprocal plantation: effect of phytoremediation on soil microbiological communities. // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – Vol. 27. – pp. 2107–2119. DOI: 10.1007/s11356-019-06645-2.

References

1. Belyuchenko I.S. Recultivation methods of recultivation of disturbed lands. *Ecological Bulletin of the North Caucasus*. 2019. Vol. 15. No. 1. pp. 4–13. (In Russ.)
2. Valiev N.G., Golik V.I., Lebzin M.S. Inertness of influence exerted by effluents of Tyrnyauz tungsten-molybdenum plant on hydrological systems of the North Caucasus. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2025. No. 1-1. pp. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_5. (In Russ.)
3. Golubev F.V., Ermakov V.V. Geochemical ecology of plants under conditions of the polymetallic biogeochemical provinces in the basin of Ardon River (North Ossetia). *Proc. of*

the XII Int. Biogeochem. School “Fundamentals of biogeochem. tech. and their applic. prosp. in nat. conserve., agriculture and medicine”. Tula. Tolstoy Tula State Pedagogical University. 2021. pp. 429–433. (In Russ.)

4. Gurbanov A.G., Leksin A.B., Gazeev V.M. et al. The ecological state of the Ardon River waters and assessment of their polluting effects on the Terek River waters – the I category object of the fisheries value. Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center. 2020. Vol. 20. No. 1. pp. 50–61. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.56948 (In Russ.)

5. Gurbanov A.G., Lolaev A.B., Leksin A.B. et al. The main sources of water pollution in the River Ardon, its degree and scale, the evaluation based on the results of geochemical study water samples from control points (RNO-A). Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center. 2018. Vol. 18. No. 3. pp. 40–50. (In Russ.)

6. Gurbanov A.G., Shazzo Yu.K., Leksin A.B. et al. Industrial waste from the Mizur mining and Processing plant of the Sadon Lead-Zinc Combine (geochemical features, assessment of their impact on the environmental situation of the adjacent territories (soil and water of the Ardon River) Republic of North Ossetia-Alania). Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center. 2012. Vol. 12. No. 4. pp. 27–40. (In Russ.)

7. Dzodzikova M.E. A retrospective analysis of the chemical status of waters in the rivers Ardon and Fiagdon in North Ossetia. In: Proceedings of the II International Scientific Conference “Regional Development in the 21st century”. Ed. A.U. Ogoev. Vladikavkaz. K.L. Khetagurov North Ossetian State University. 2017. pp. 354–356. (In Russ.)

8. Zhinzhakova L.Z., Cherednik E.A. Long-term observations of trace elements content in the waters of the glacial river Ardon for the period 2005–2018. Modern Science. 2019. No. 4-2. pp. 24–29. (In Russ.)

9. Zvereva V.P., Frolov K.R., Lysenko A.I. Impact of technogenic waters on the Rudnaya River of the Russian Far East. Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering. 2022. Vol. 333. No. 10. pp. 49–58. DOI: 10.18799/24131830/2022/10/3715. (In Russ.)

10. Reutova T.V., Dreeva F.R., Reutova N.V., Khutuev A.M. Fluoride content in river waters of the Western part of the Terek River basin. In: Proceedings of the X All-Russian Scientific and Technical Conference “Modern problems of geology, geophysics and geocology of the North Caucasus”. Grozny. Format. 2020. pp. 506–512. (In Russ.)

11. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R. Comparative characteristics of aluminum and arsenic content in surface waters of the Elbrus and Kazbek volcanic centers. Geology and Geophysics of Russian South. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 231–243. DOI: 10.46698/VNC.2024.80.62.018. (In Russ.)

12. Savenko A.V., Savenko V.S. Immobilization of aluminum at the carbonate geochemical barrier. High-tech Technologies. 2018. Vol. 19. No. 1. pp. 44–47. (In Russ.)

13. Sariev A.Kh., Shcherbakova N.N., Terentyeva N.Yu. Assessment of the possibility of biological recultivation of tailings in the Yenisei North. Ecology and Industry of Russia. 2021. Vol. 25. No. 5. pp. 39–45. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-5-39-45. (In Russ.)

14. Chigoeva D.N., Kamanina I.Z., Kaplina S.P. Concentration of heavy metals in water flows in the area of Unal tailings dam and Ardon River. South of Russia: Ecology, Development. 2018. Vol. 13. No. 2. pp. 113–122. DOI: 10.18470/1992-1098-2018-2-113-122 (In Russ.)

15. Chowdhury S.R., Yanful E.K., Pratt A.R. Recycling of nickel smelter slag for arsenic remediation – an experimental study. Environmental Science and Pollution Research. 2014. Vol. 21. pp. 10096–10107.

16. Kacmaz H. Assessment of heavy metal contamination in natural waters of Dereli, Giresun: an area containing mineral deposits in northeastern Turkey. Environmental Monitoring and Assessment. 2020. Vol. 192. No. 2. pp. 1–12. DOI: 10.1007/s10661-019-8057-0.

17. Mohd S., Fazil Q., Salman A. et al. A Comprehensive review on arsenic contamination in groundwater: sources, detection, mitigation strategies and cost analysis. Environmental Research. 2025. Vol. 265. Art. No. 120457. DOI: 10.1016/j.envres.2024.120457.

18. Sasireka R., Vinoth R., Abhishek Sh., Sugumari V., Madheswaran M. Arsenic and environment: a systematic review on arsenic sources, uptake mechanism in plants, health hazards and remediation strategies. *Topics in Catalysis*. 2024. Vol. 67. pp. 1–17. DOI: 10.1007/s11244-023-01901-9.
19. Simion A.F., Drebenstedt C., Lazar M. The influence of tailings storage facilities in the eastern part of Jiu valley on the water quality. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2019. Vol. 4. No. 4. pp. 292–301. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-4-292-301.
20. Zhang L., Liu W., Liu S. et al. Revegetation of a barren rare earth mine using native plant species in reciprocal plantation: effect of phytoremediation on soil microbiological communities. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. pp. 2107–2119. DOI: 10.1007/s11356-019-06645-2.

УДК 911.2, 504.05, 551.582

DOI: 10.46698/VNC.2025.67.94.001

Оригинальная статья

Пространственно-временные вариации трендов индекса NDVI в горных и предгорных районах Северного Кавказа

В.Ю. Тимченко[✉], Е.С. Каменецкий[✉], А.А. Радионов[✉]

Южный математический институт Владикавказского научного центра РАН,
Россия, 362025, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 53,
e-mail: aar200772@mail.ru

Статья поступила: 11.02.2025, доработана: 19.05.2025, принята к публикации: 21.05.2025

Резюме: Актуальность работы. Климатические изменения в Северо-Кавказском регионе приводят к изменению температурного и водного режима, что непосредственно влияет на многолетнюю изменчивость растительной биомассы и урожайность, следовательно, на устойчивое развитие сельского хозяйства, которое является одной из ведущих отраслей экономики. **Целью** исследования является изучение изменчивости количества фитомассы в горных и предгорных районах центральной части Северного Кавказа и выявление возможных агроклиматических проблем. **Методы.** Используется геопространственный отбор многолетних данных индекса вегетации NDVI для локаций исследуемой территории. Для рядов двухнедельных композитов NDVI вычислялась интегральная характеристика и проверялась модель линейной регрессии, позволяющая вычислить статистические параметры уклонов и у-пересечения. Использование QGIS и метода интерполяции изолиниями для построения карт распределения этих параметров позволяет выявить границы районов с многолетним уменьшением индексов вегетации при геоэкологическом районировании. **Результаты.** Показано, что для территории РСО-Алания и прилегающих предгорных районов индекс вегетации складывается за счет большой фитомассы лесных ландшафтов и имеет положительный тренд, что свидетельствует о сохранении благоприятных климатических условий в них. Для горных районов с высокогорным ландшафтом, покрытых альпийскими лугами или без растительного покрытия, количество фитомассы в целом небольшое, но имеет положительный тренд на увеличение, что также свидетельствует о благоприятных условиях для фитоценоза. Для равнинных районов Осетинской наклонной равнины и лесостепных ландшафтов в районе г. Дигоры – г. Беслана – с. Заманкул, на южных склонах Сунженского и Терского хребтов имеются участки с многолетним трендом на уменьшение индекса вегетации, что свидетельствует о деградации растительного покрова, изменении температурного и водного режимов этих локаций. **Выводы.** Для предгорных ландшафтов на территории РСО-Алания и прилегающих районов индекс NDVI имеет положительный тренд многолетней изменчивости. Равнинные и степные районы, а также южные склоны Сунженского и Терского хребтов имеют отрицательный уклон трендов индексов вегетации.

Ключевые слова: MODIS, индекс вегетации, NDVI, QGIS, статистические параметры, тренды, многолетние изменения, Северный Кавказ.

Для цитирования: Тимченко В.Ю., Каменецкий Е.С., Радионов А.А. Пространственно-временные вариации трендов индекса NDVI в горных и предгорных районах Северного Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 231-243. DOI: 10.46698/VNC.2025.67.94.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.67.94.001

Original paper

Spatiotemporal variations of NDVI index trends in mountainous and foothill areas of the North Caucasus

V.Yu. Timchenko^{}, E.S. Kamenetsky^{}, A.A. Radionoff^{}

Southern Mathematical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences,
53 Vatutina Str., Vladikavkaz 362025, Russian Federation,
e-mail: aar200772@mail.ru

Received: 11.02.2025, revised: 19.05.2025, accepted: 21.05.2025

Abstract: Relevance. Climatic changes in the North Caucasus region lead to changes in the temperature and water regime. This directly affects the long-term variability of plant biomass and yields, and consequently, the sustainable development of agriculture, which is one of the leading sectors of the economy. **The aim** of this research is to study the variability of the amount of phytomass in the mountainous and foothill areas of the central part of the North Caucasus and identify possible agro-climatic problems. **Methods.** Geospatial selection of long-term NDVI vegetation index data is used for the locations of the studied territory. For the two-week NDVI series, an integral characteristic was calculated and a linear regression model was tested, which makes it possible to calculate statistical parameters of slopes and y-intersections. Using QGIS and the isoline interpolation method to build maps of the distribution of these parameters allows us to identify the boundaries of areas with a long-term decrease in vegetation indices during geoecological zoning. **Results.** It is shown that for the territory of the Republic of North Ossetia–Alania and adjacent foothill areas, the vegetation index is formed due to the large phytomass of forest landscapes and has a positive trend, which indicates the preservation of favorable climatic conditions in them. For mountainous areas with a high-altitude landscape covered with alpine meadows or without vegetation, the amount of phytomass is generally small, but has a positive upward trend, which also indicates favorable conditions for phytocenosis. For the lowland areas of the Ossetian inclined plain and forest-steppe landscapes in the area of Digora – Beslan – Zamankul, on the southern slopes of the Sunzhensky and Tersky ranges there are areas with a long-term trend towards a decrease in the vegetation index, which indicates the degradation of vegetation cover, changes in temperature and water regimes of these locations. **Conclusions.** For foothill landscapes in the territory of the Republic of North Ossetia–Alania and adjacent areas, the NDVI index has a positive trend of long-term variability. The lowland and steppe regions, as well as the southern slopes of the Sunzhensky and Tersky ranges, have a negative trend bias in vegetation indices.

Keywords: MODIS, vegetation index, NDVI, QGIS, statistical parameters, trends, long-term changes, North Caucasus.

For citation: Timchenko V.Yu., Kamenetsky E.S., Radionoff A.A. Spatiotemporal variations of NDVI index trends in mountainous and foothill areas of the North Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 231–243. DOI: 10.46698/VNC.2025.67.94.001

Введение

Изменение климата непосредственно оказывает влияние на фенологический цикл растительного покрова и выражается в сдвиге дат начала и окончания сезона роста, изменении продолжительности благоприятного для роста периода [Mortier et al.,

2023]. Оценка влияния глобальных климатических изменений на окружающую среду и различные секторы экономики, адаптация хозяйственной и экономической деятельности к этим изменениям, представлены в Климатическом докладе за 2023 (https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf) и в работах [Abbass et al., 2022; Aryal et al., 2020; Chausson et al., 2020; Malhi et al., 2021; Asadi et al., 2005].

Анализ климатических изменений Северного Кавказа, влияние на водный режим и прогноз возможного агроклиматического влияния, способы адаптации рассмотрены в работах [Лурье, Панов, 2013; Ашабоков и др., 2020]. Наблюдаемым в горных районах Кавказа климатическим изменениям и их влиянию на развитие опасных гидрометеорологических явлений посвящены работы [Аджиева, Кондратьева, 2009; Яицкая и др., 2023].

Индекс NDVI является опережающим индикатором наличия, роста и общего объема фитомассы и характеристикой агроэкологического состояния территории [Черепанов, Дружинина, 2011], способен указать на ухудшение состояния растений в определенной зоне, но не дает прямых указаний о причинах возникновения проблем [Родимцев и др., 2022].

В работах [для примера Skakun et al., 2017] описано использование спутниковых данных с высоким пространственным разрешением и с временной точностью 3-5 суток для выявления пика значений NDVI и определения времени сбора урожая.

Для Большого Кавказа [Братков и др., 2016] описан метод выделения и уточнения границ природно-территориальных комплексов наиболее высоких классификационных уровней (типов и подтипов ландшафтов) на основе индекса NDVI. Для Ставропольского края [Савинова и др., 2023] на основе данных дистанционного зондирования Земли был рассчитан индекс NDVI по космическим снимкам среднего разрешения 60 м на пиксель, что позволило рассчитать величину NDVI в разные моменты активной вегетации основных типов сельскохозяйственных угодий. Оценка агроклиматических условий степных и семиаридных ландшафтов для Чеченской республики показана в работах [Керимов и др., 2024а; Керимов и др., 2024б], в которых с применением беспилотных летно-подъемных средств строились карты распределения NDVI с высоким пространственным разрешением.

Для урбанизированных, тундровых и лесных районов Западной Сибири [Esau et al., 2016] исследовался климатический отклик экосистем на основе карт индекса NDVI высокого разрешения (250 м на пиксель) по максимальным (пиковым) за лето значениям индекса и его среднегодовым значениям. Для горных районов Qinling-Daba Китая [Yao, 2024] на основе снимков с разрешением 30 м проводилась статистическая обработка распределения NDVI.

В данной работе предпринята попытка определения пространственного распределения трендов индекса NDVI по спутниковым данным низкого разрешения за многолетний период для горных, предгорных и равнинных районов РСО-Алания. Целью работы является определение многолетних климатических изменений и определение территории с возможной деградацией растительного покрова, индикатором которого служит индекс вегетации NDVI. Исследуется поле значений индекса вегетации, его пространственное распределение, а также соответствующие многолетние статистические тренды.

Методика

Для получения исходных данных используется расширенная и модифицированная методика отбора и статистической обработки рядов индексов вегетации, предложенная в работе [Каменецкий и др., 2021].

В качестве источника информации о пространственном и временном распределении вегетационного индекса NDVI и температуры использованы спутниковые данные NASA многоканальных спектрорадиометров MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, <http://modis.gsfc.nasa.gov>), находящиеся в открытом доступе.

Для проведения исследования выбран прямоугольный участок между 42.5° – 43.8° с.ш. и 42.9° – 45.0° в.д., с шагом сетки 0.1° по широте и долготе для приведения в соответствие участкам пикселям карт-схем.

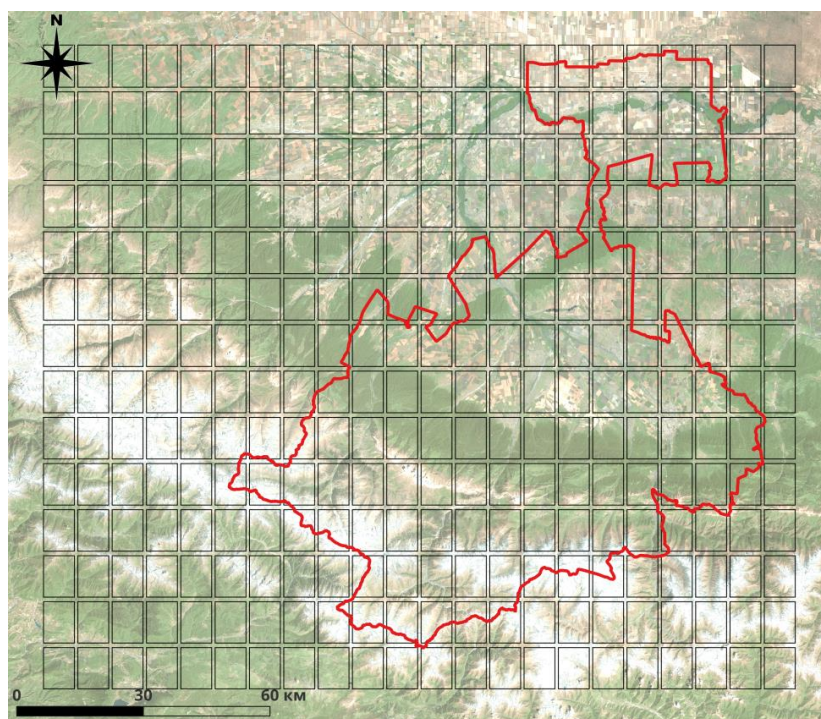


Рис. 1. Исследуемый участок. Расположение: по широте $42^{\circ}.5 - 43^{\circ}.8$ СШ и по долготе $42^{\circ}.9 - 45^{\circ}.0$ ВД, шаг сетки 0.1° . Программное обеспечение QGIS (<https://qgis.org>) /

Fig. 1. The area under study. Location: latitude $42^{\circ}.5 - 43^{\circ}.8$ N and longitude $42^{\circ}.9 - 45^{\circ}.0$ E, grid pitch 0.10 . QGIS Software (<https://qgis.org>)

В выбранный район попадает горная и предгорная территория РСО-Алания, Кабардино-Балкарской республики (КБР), Республики Ингушетия (РИ), с севера – равнинные районы Ставропольского края. В центре исследуемой территории находятся более низкие (до 1000 м) Сунженский и Терский хребты.

На рисунке 1 представлена спутниковая карта исследуемого региона с нанесенными по координатам полигонами, каждому пикселю карты-сцены соответствует центр полигона разрешением 8×10 км. Для каждого полигона вычисляется ряд из 24 значений годовых интегральных характеристик I_n численным интегрированием (методом Симпсона) графика годового изменения индекса NDVI. Для каждой ландшафтной локации проводился корреляционный анализ, проверялась модель линейной регрессии между значениями I_n и временем в виде:

$$I_n = at + b \quad (1)$$

где a – уклон линии тренда, b – у-пересечение (значение I_n в начале периода времени), t – время, в годах (от начала исследуемого периода).

Ввиду малости уклонов трендов значения у-пересечений изменяются в достаточно узком промежутке и примерно могут быть приняты в качестве многолетнего годового среднего значения интегральной характеристики для всего ряда. Далее под у-пересечением I_n подразумевается многолетнее среднее значение I_n .

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 в качестве примера для одной локации вблизи г. Владикавказа (локация обозначается $ndvi_5_17$), приведен график годового хода NDVI за весь период 2000-2023 гг., годовые значения интегральной характеристики I_n , образуют ряд, для которого построен линейный тренд изменчивости за многолетний период.

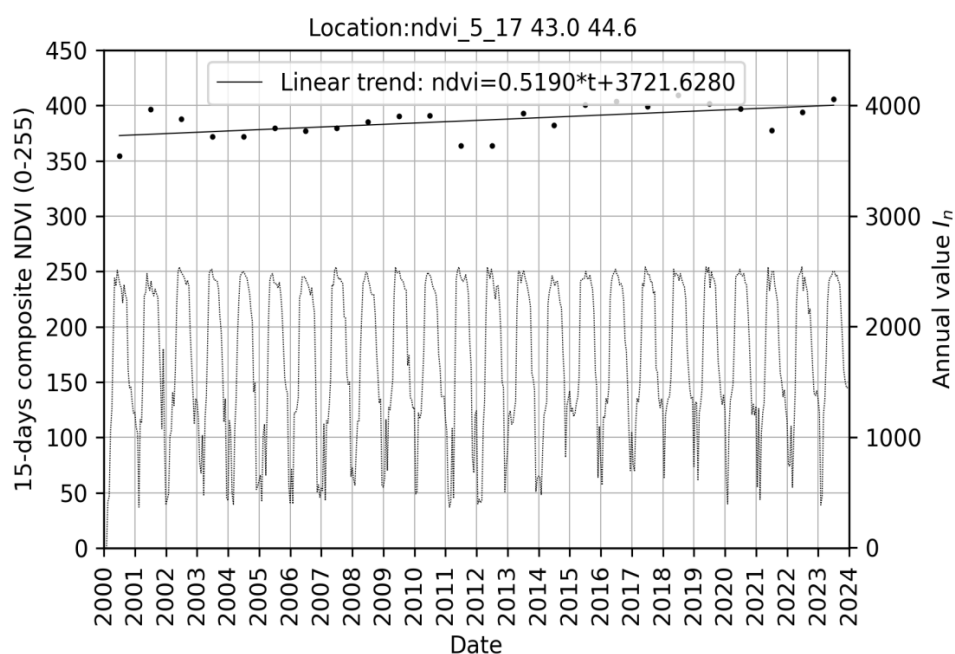


Рис. 2. График NDVI для локации вблизи г. Владикавказа ($ndvi_5_17$) за период 2000-2023 гг. Точечная линия – значения NDVI (отсчет ведется по левой шкале), кружки – значения I_n за год (отсчет ведется по правой шкале), прямая сплошная линия – тренд изменения ряда I_n /

Fig. 2. NDVI plot for locations near Vladikavkaz. ($ndvi_5_17$) for the period 2000-2023. The dotted line represents the NDVI values (calculated on the left scale), the circles represent the I_n values for the year (calculated on the right scale), and the straight solid line represents the trend in the I_n series

Тонкой точечной линией приведен годовой ход осредненных за 15 дней значений NDVI (значения двухнедельных композитов, отсчет ведется по левой шкале), кружками – вычисленные годовые значения интеграла I_n (отсчет ведется по правой шкале, на графике кружки установлены в начале соответствующего года), сплошная линия – построенный по формуле (1) тренд изменчивости интегральной характеристики I_n .

Полученные параметры у-пересечений для всех 308 ландшафтных локаций, образующих 14 рядов по 22 полигона, наносились на карту по соответствующим координатам с использованием геоинформационной системы (ГИС) QGIS (<https://>

qgis.org/), модулями пространственной интерполяции Contour plugin (<https://github.com/ccrook/QGIS-Contour-Plugin>) и приведены на рисунке 3. Насыщенность полигона соответствует значению у-пересечения локации и приводится в цветной выноске карты. Параметр у-пересечение I_n (с учетом малости уклона) характеризует среднее суммарное годовое количество фитомассы локации за многолетний период.

Из рисунка 3 видно, что наибольшие значения интегральной характеристики I_n (насыщенные зеленые полигоны) приходятся на предгорья Северного Кавказа – на северные склоны Лесистого и Пастбищного Хребтов, где преобладают ландшафты широколиственных и смешанных лесов, много наземных крупных и мелких источников водообеспечения и практически не ведется активная хозяйственная деятельность и вырубка леса. Здесь значения I_n находятся в диапазоне 3500–3800. Также, достаточно высокие значения I_n (3200–3500) приходятся на северные склоны Сунженского Хребта.

Минимальные значения I_n (светлые полигоны) приходятся на высокогорные и скалистые участки Главного Кавказского и Бокового хребтов, покрытые ледниками, не имеющие растительности. Относительно низкие значения I_n (2200–2700) на картах проявляются севернее г. Моздока в степных и лесостепных ландшафтах, где также ведется активная сельскохозяйственная деятельность. Промежуточные по параметру I_n локации приходятся на луговые и лесостепные участки равнинной территории РСО-Алания и КБР.

На рисунке 4 представлена пространственная интерполяция в виде изолиний у-пересечений интегральной характеристики многолетних индексов NDVI. Опорные значения у-пересечений I_n подписаны на изолиниях.

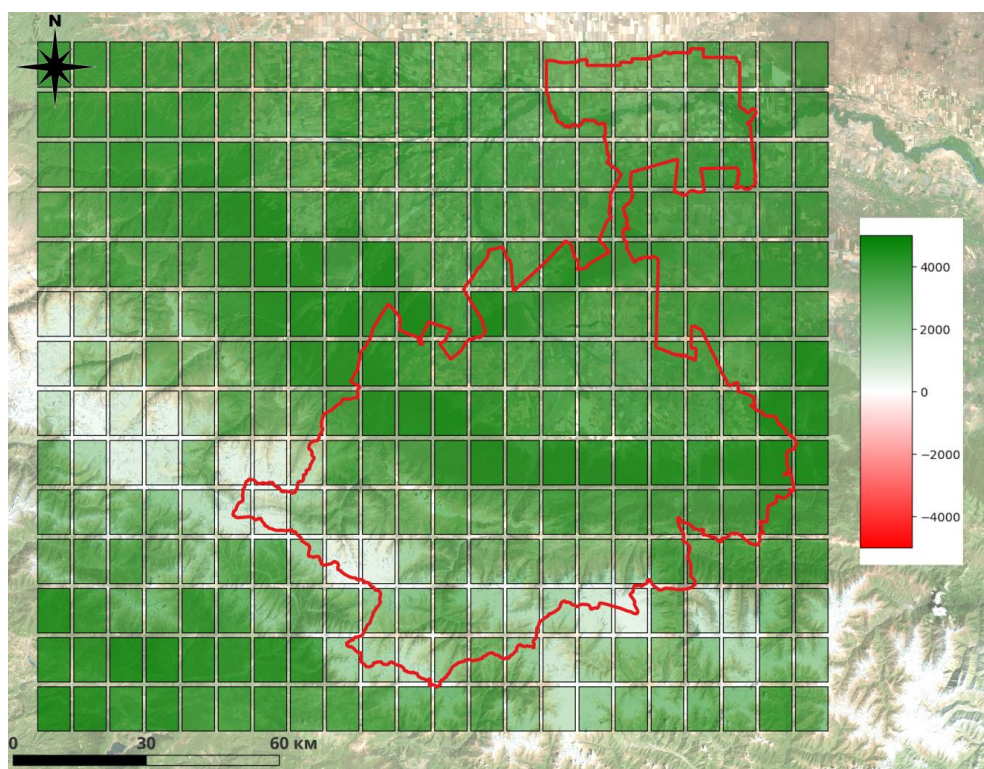


Рис. 3. Значения у-пересечений тренда I_n для изучаемых локаций /

Fig. 3. Values of y-trend intersections I_n for the studied locations

За 24-летний период для исследуемого района средние от годовых интегралов индекса NDVI (у-пересечения трендов) изменяются в пределах от низких значений 415 (для высокогорных локаций) до высоких значений 3944 (для предгорной локации вблизи с. Урух и с. Чикола).

Анализ рисунка 4 показывает, что наибольшая густота линий (которая соответствует наибольшему пространственному градиенту) приходится на границу между Главным и Скалистым хребтами, по границе растительности, а также по границе раздела участков, покрытых лесом и луговым, лесостепным ландшафтом. Изолинии в равнинных, луговых и степных ландшафтах повторяют контуры основных наземных источников водообеспечения. Это указывает на значимое влияние наличия таких наземных источников на величину фитомассы.

Внутри лесных ландшафтов изолинии I_n распределены приблизительно равномерно и в основном повторяют границы лесных массивов вне зависимости от присутствия наземных источников.

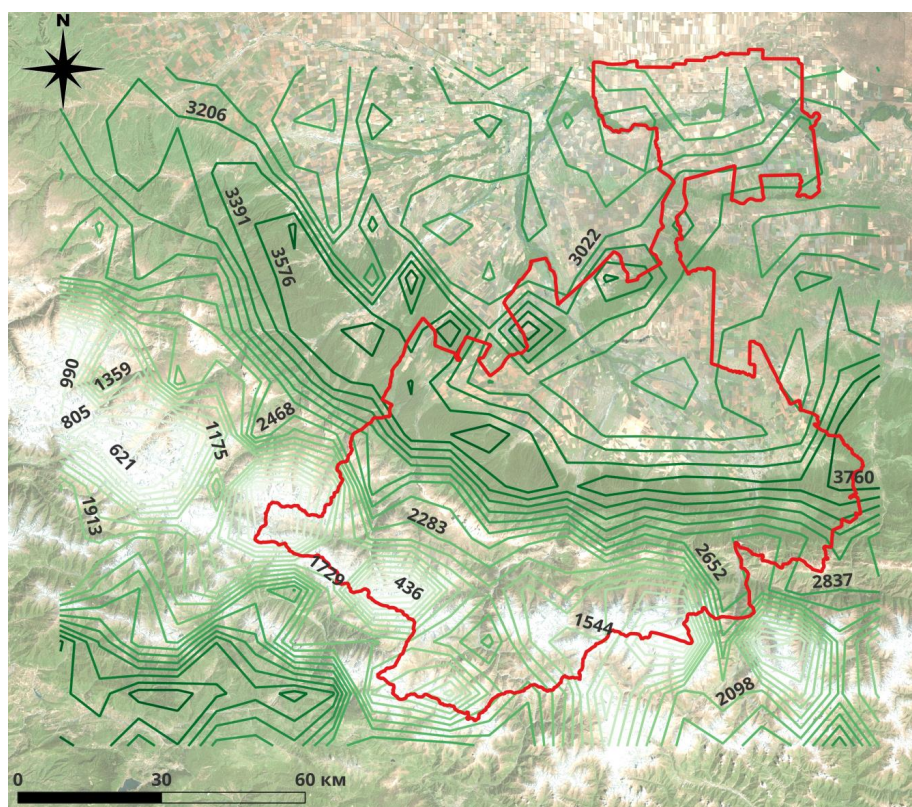


Рис. 4. Пространственная интерполяция у-пересечений трендов I_n в виде несглаженных изолиний /
Fig. 4. Spatial interpolation of y-intersections of I_n trends in the form of non-smoothed isolines

Аналогичным образом проведено картографическое нанесение уклонов трендов интегральной характеристики I_n . На рисунке 5 показана карта значений уклонов трендов I_n , которая характеризует общую многолетнюю тенденцию развития фитомассы в данной локации. Насыщенность полигона соответствует значению уклона тренда в данной локации относительно максимальных и минимальных значений по модулю по сравнению с другими локациями, а цвет показывает положительный или отрицательный знак уклонов, изображенных на карте, шкала приводится в цветной выноске карты.

Из рисунка 5 видно, что положительные тренды, свидетельствующие о суммарном возрастании годовых значений индекса вегетации для ландшафтных локаций, расположены на большей части Лесистого и Пастбищного хребтов. На территории северных склонов Большого Кавказа наибольшее значение уклона тренда I_n (уклон = 0.925–0.945) зафиксировано в локациях Высокогорный Государственный заповедник Верхняя Балкария, Национальный парк Алания, н.п. Бурон. В указанных локациях присутствует лесной ландшафт, покрытие – смешанный и хвойный лес.

Отрицательные уклоны трендов показывают суммарное сокращение индексов вегетации и фиксируются на большей части равнинной территории РСО-Алания – Осетинской наклонной равнины, на южных, имеющих сильную инсоляцию, склонах Терского и Сунженского хребтов.

Наибольшие по модулю отрицательные тренды I_n (отмечены красными полигонами на рис. 5, уклон от -0.287 до -0.414) зафиксированы в локациях Осетинская наклонная равнина и северные склоны Сунженского хребта РСО-Алания в районе н.п. Красногор, н.п. Красный Ход, г. Дигора, ландшафт лесостепной, ведется активная сельскохозяйственная обработка земли; локации на южных склонах Сунженского хребта в районе н.п. Заманкул, Брут, РСО-Алания и н.п. Далаково и Кантышево, РИ; локации на равнинной части РСО-Алания, в районе н.п. Нарт, ст. Архонская, с. Михайловское, ландшафт лесостепной и степной, ведется активная сельскохозяйственная деятельность, дорожные и строительные работы, пастбищное скотоводство.

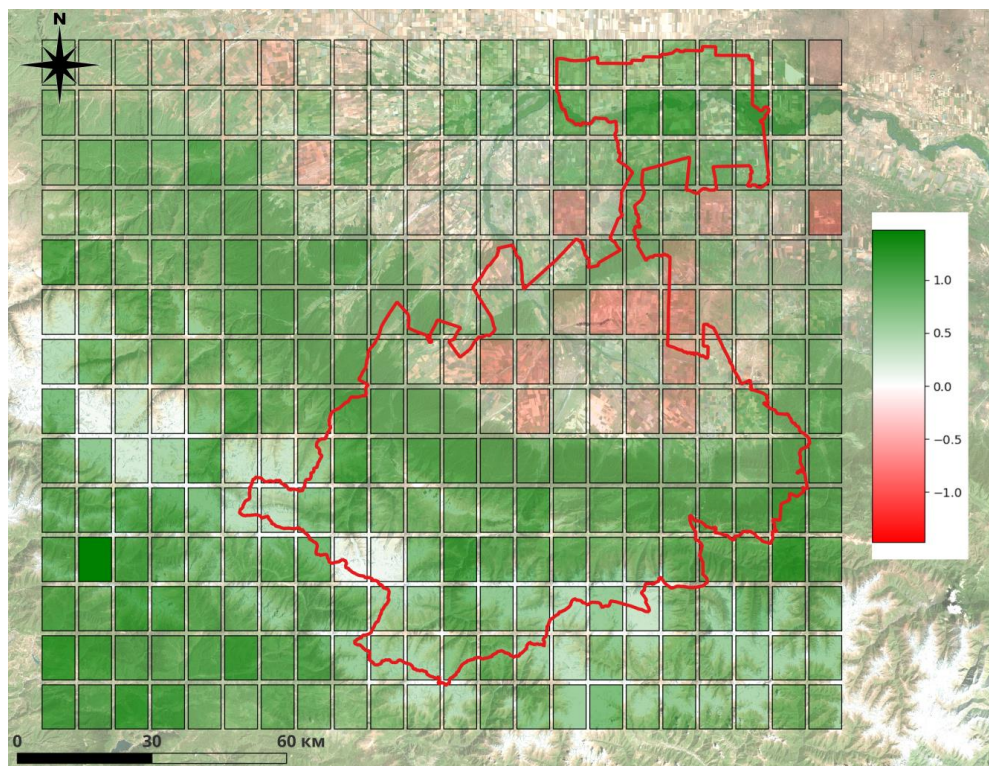


Рис. 5. Пространственное распределение полигонов по значениям уклонов трендов I_n /

Fig. 5. Spatial distribution of polygons according to the values of trend slopes I_n

На рисунке 6 представлена пространственная интерполяция уклонов I_n (опорные значения подписаны на изолиниях), которые изменяются в пределах от -0.592

(для высокогорных локаций) до +1.471 (для равнинных локаций). Околонулевые значения уклонов зафиксированы в некоторых высокогорных и равнинных районах.

Следует отметить, что ряд локаций (РСО-Алания – северо-восточнее г. Беслана, с. Карджин, с. Заманкул, с. Батако, п. Заводской, г. Ардон, с. Красногор) имеют достаточно низкие многолетние средние значения I_n . При наличии наземных источников водообеспечения – русел рек Терек, Ардон в совокупности с отрицательными значениями уклонов тренда это может указывать на активную хозяйственную и строительную деятельность, а также на возможные агроэкологические проблемы в этих локациях (изменение температурного или водного баланса, изменения в составе посевов или деградация растительного покрова).

Наличие таких микрорегионов требует дополнительных исследований в совокупности с учетом трендов температуры, водообеспеченности и дополнительных ирригационных или мелиорационных мероприятий.

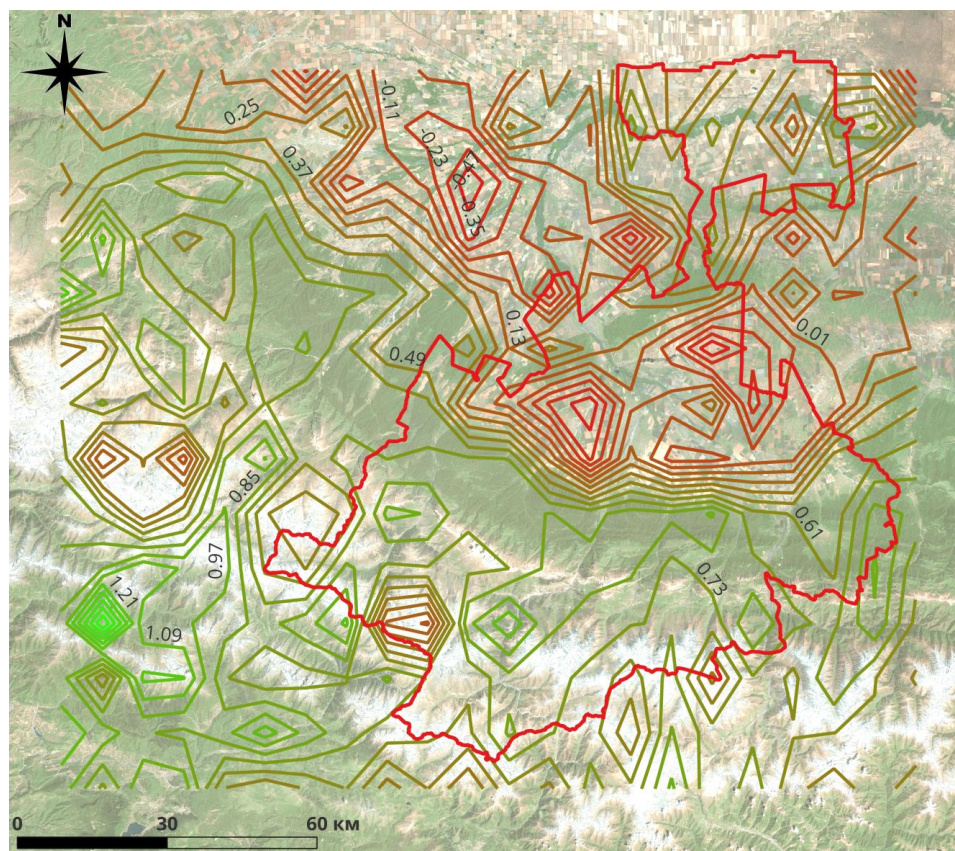


Рис. 6. Пространственное распределение изолиний уклонов многолетних трендов I_n индексов NDVI /
Fig. 6. Spatial distribution of long-term NDVI index trend slopes in the isolines form

Анализ распределения изолиний показывает несколько локализованных групп близлежащих локаций, объединенных общими отрицательными уклонами тренда I_n , в которых фитомасса сокращается наиболее заметно, в основном на равнинной части РСО-Алания, вблизи г. Алагир, г. Дигоры, с. Красногор, с. Мостиздах, ст. Архонская, с. Нарт, с. Дарг-Кох, с. Заманкул, с. Цалык, с. Верхний Курп, КБР, с. Далаково, с. Кантышево, РИ.

Заключение

Климатические изменения сказываются на геоэкологических и агроклиматических показателях территории Северо–Кавказского региона, для которого сельское хозяйство является одной из ведущих отраслей экономики и его устойчивое развитие в значительной мере зависит от климатических условий и их изменчивости.

Интегральная характеристика индекса вегетации учитывает совокупные особенности изменения NDVI в течение года. Многолетние средние I_n по сравнению с другими локациями, указывают на влияние локальных климатических условий на вегетацию растений и долговременные изменения для рассматриваемого ландшафтного региона. Полученные на основе спутниковых данных карты распределения уклонов трендов и у-пересечений позволяют получить быструю оценку условий сельскохозяйственной деятельности и сравнить их для относительно близко расположенных районов с различными ландшафтами со множеством дифференцированных компонентов.

Полученные результаты целесообразно учитывать при планировании мелиоративных мероприятий в этих районах, для использования в геоэкологическом районировании и повышения эффективности природопользования.

Выводы

Для предгорных ландшафтов на территории РСО-Алания и прилегающих районов индекс вегетации имеет высокие значения за счет большой фитомассы лесных массивов и положительный тренд многолетней изменчивости, что свидетельствует о сохранении благоприятных климатических условий.

Для высокогорных районов, покрытых альпийскими лугами или без растительного покрытия, количество фитомассы в целом небольшое, но имеет положительный тренд, что также свидетельствует о благоприятных условиях для фитоценоза.

Для равнинных районов Осетинской наклонной равнины и лесостепных ландшафтов тренды многолетней изменчивости разнонаправлены. В районе г. Дигоры – г. Беслана – с. Заманкул, на южных склонах Сунженского и Терского хребтов имеются участки с многолетним трендом на уменьшение индекса вегетации, что свидетельствует о признаках многолетней деградации растительного покрова ввиду возможного изменения температурного и водного режимов этих локаций. С использованием ГИС QGIS методом интерполяции изолиниями построены карты распределения уклонов трендов NDVI, анализ которых позволяет выявить границы районов с многолетним уменьшением индексов вегетации.

Литература

1. Аджиева А.А., Кондратьева Н.В. Изменение климата и гидрометеорологические явления в горных районах Кавказа. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2009. – Т. 1. № 1. – С. 68–72.
2. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В. Пространственно-временное изменение климата юга европейской территории России, оценка его последствий, методы и модели адаптации АПК. Нальчик: Печатный двор, 2020. – 476 с.
3. Братков В.В., Кравченко И.В., Туаев Г.А., Атаев З.В., Абдулжалимов А.А. Применение вегетационных индексов для картографирования ландшафтов Большого Кавказа. // Известия ДГПУ. Естественные и точные науки. – 2016. – Т. 10. № 4. – С. 97–111.

4. Каменецкий Е.С., Радионов А.А., Тимченко В.Ю., Панаэтова О.С. Об изменчивости вегетационного индекса NDVI в предгорных районах Северного Кавказа по данным спутниковых измерений. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т. 13. № 1(47). – С. 44–52. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-44-52.
5. Керимов И.А., Братков В.В., Бекмурзаева Л.Р. Динамика агроклиматических показателей степных ландшафтов Северного Кавказа по данным наземных наблюдений. // Геология и геофизика Юга России. – 2024а. – Т. 14. № 2. – С. 219–230. DOI: 10.46698/VNC.2024.92.31.017.
6. Керимов И.А., Эльжаев А.С., Додуев А.А. Дистанционный мониторинг лесных территорий (на примере эталонного участка «Рошни-Чу»). // Геология и геофизика Юга России. – 2024б. – Т. 14. № 4. – С. 180–191.
7. Лурье П.М., Панов В.Д. Влияние изменения климата на современное оледенение и сток рек северного склона Большого Кавказа. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2013. – Т. 5. № 2. – С. 70–77.
8. Савинова С.В., Братков В.В., Мурашова И.Д., Ключин П.В., Гусейнова Н.О. Оценка изменения NDVI сельхозугодий Ставропольского края за период активной вегетации в 2020 г. по снимкам среднего пространственного разрешения. // Юг России: экология, развитие. – 2023. – Т. 18. № 2. – С. 82–91. DOI: 10.18470/1992-1098-2023-2-82-91.
9. Родимцев С.А., Павловская Н.Е., Вершинин С.В., Горькова И.В., Гагарина И.Н. Использование вегетативного индекса NDVI для прогноза урожайности зерновых культур. // Вестник Новосибирского государственного университета. – 2022. – № 4. – С. 56–67. DOI: 10.31677/2072-6724-2022-65-4-56-67.
10. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Вегетационные индексы. // Геоматика. – 2011. – № 2. – С. 98–102.
11. Яицкая Н.А., Дзаганя Л.М., Бригада В.С. Геоэкологические опасности в условиях климатических изменений территорий субтропической зоны Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 118–132. DOI: 10.46698/VNC.2023.54.85.010.
12. Abbass K., Qasim M.Z., Song H., Murshed M., Mahmood H., Younis I. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. // Environmental Science and Pollution Research. – 2022. – Vol. 29. – pp. 42539–42559. DOI: 10.1007/s11356-022-19718-6.
13. Aryal J.P., Sapkota T.B., Khurana R., Khatri-Chhetri A., Rahut D.B., Jat M.L. Climate change and agriculture in South Asia: adaptation options in smallholder production systems. // Environment, Development and Sustainability. – 2020. – Vol. 22. – pp. 5045–5075. DOI: 10.1007/s10668-019-00414-4.
14. Asadi M.E. Effects of global climate change on water resources. // Journal of Agricultural Meteorology. – 2005. – Vol. 60. Issue 5. – pp. 637–640. DOI: 10.2480/agrmet.637.
15. Chausson A., Turner B., Seddon D., Chabaneix N., Girardin C.A.J., Kapos V., Key I., Roe D., Smith A., Woroniecki S., Seddon N. Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation. // Global Change Biology. – 2020. – Vol. 26. Issue 11. – pp. 6134–6155. DOI: 10.1111/gcb.15310.
16. Esau I., Miles V.V., Davy R., Miles M.W., Kurchatova A. Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia. // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2016. – Vol. 16. Issue 15. – pp. 9563–9577. DOI: 10.5194/acp-16-9563-2016.
17. Malhi G.S., Kaur M., Kaushik P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: a review. // Sustainability. – 2021. – Vol. 13. Issue 3. – pp. 1318–1339. DOI: 10.3390/su13031318.
18. Mortier S., Hamedpour A., Bussmann B., Wandji R.Ph.T., Latre S., Sigurdsson B.D. et al. Inferring the relationship between soil temperature and the normalized difference vegetation index with machine learning. // Machine Learning. – 2023. – 31 p. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2024.102730.

19. Skakun S., Vermote E., Roger J-C., Franch B. Combined use of Landsat-8 and Sentinel-2A images for winter crop mapping and winter wheat yield assessment at regional scale. // *AIMS Geosciences*. – 2017. – Vol. 3. Issue 2. – pp. 163–186. DOI: 10.3934/geosci.2017.2.163.

20. Yao Y. Pattern and change of NDVI and their environmental influencing factors for 1986–2019 in the Qinling-Daba Mountains of central China. // *Frontiers in Forests and Global Change*. – 2024. – Vol. 7. Art. No. 1372488. DOI: 10.3389/ffgc.2024.1372488.

References

1. Adzhieva A.A., Kondratieva N.V. Climate change and hydrometeorological phenomena in the mountainous regions of the Caucasus. *Sustainable Development of Mountainous Territories*. 2009. Vol. 1. No. 1. pp. 68–72. (In Russ.)

2. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Tashilova A.A., Kesheva L.A., Teunova N.V. Spatial and temporal climate change in the south of the European territory of Russia, assessment of its consequences, methods and models of agro-industrial complex adaptation. Nalchik. Pechatnyy dvor. 2020. 476 p. (In Russ.)

3. Bratkov V.V., Kravchenko I.V., Tuaeov G.A., Ataev Z.V., Abdulgalimov A.A. Application of vegetation indexes for mapping landscapes of the Greater Caucasus. *Proceedings of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and Exact Sciences*. 2016. Vol. 10. No. 4. pp. 97–111. (In Russ.)

4. Kamenetsky E. S., Radionov A. A., Timchenko V. Yu., Panaetova O. S. On the variability of the NDVI vegetation index in the foothill regions of the North Caucasus according to satellite measurements. *Sustainable Development of Mountainous Territories*. 2021. Vol. 13. No. 1(47). pp. 44–52. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-44-52. (In Russ.)

5. Kerimov I.A., Bratkov V.V., Bekmurzayeva L.R. Dynamics of agro-climatic indicators of steppe landscapes of the North Caucasus according to ground-based observations. *Geology and geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 219–230. DOI: 10.46698/VNC.2024.92.31.017. (In Russ.)

6. Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Doduev A.A. Remote monitoring of forest territories (on the example of the reference site “Roshni-Chu”). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 180–191. (In Russ.)

7. Lurie P.M., Panov V.D. The influence of climate change on modern glaciation and river flow in the northern slope of the Greater Caucasus. *Sustainable Development of Mountainous Territories*. 2013. Vol. 5. No. 2. pp. 70–77. (In Russ.)

8. Savinova S.V., Bratkov V.V., Murashova I.D., Klyushin P.V., Huseynova N.O. Assessment of the NDVI change in farmland in the Stavropol Territory during the period of active vegetation in 2020 based on medium spatial resolution images. *South of Russia: Ecology, Development*. 2023. Vol. 18. No. 2. pp. 82–91. DOI: 10.18470/1992-1098-2023-2-82-91. (In Russ.)

9. Rodimtsev S.A., Pavlovskaya N.E., Vershinin S.V., Gorkova I.V., Gagarina I.N. The use of the NDVI vegetative index for predicting grain yields. *Bulletin of Novosibirsk State University*. 2022. No. 4. pp. 56–67. DOI: 10.31677/2072-6724-2022-65-4-56-67. (In Russ.)

10. Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Vegetation indexes. *Geomatica*. 2011. No. 2(11). pp. 98–102. (In Russ.)

11. Yaitskaya N.A., Dzaganina L.M., Brigida V.S. Geoecological hazards in the context of climatic changes in the territories of the subtropical zone of the Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 118–132. DOI: 10.46698/VNC.2023.54.85.010. (In Russ.)

12. Abbass K., Qasim M.Z., Song H., Murshed M., Mahmood H., Younis I. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. pp. 42539–42559. DOI: 10.1007/s11356-022-19718-6.

13. Aryal J.P., Sapkota T.B., Khurana R., Khatri-Chhetri A., Rahut D.B., Jat M.L. Climate change and agriculture in South Asia: adaptation options in smallholder production systems. *Environment, Development and Sustainability*. 2020. Vol. 22. pp. 5045–5075. DOI: 10.1007/s10668-019-00414-4.
14. Asadi M.E. Effects of global climate change on water resources. *Journal of Agricultural Meteorology*. 2005. Vol. 60. Issue 5. pp. 637–640. DOI: 10.2480/agrmet.637.
15. Chausson A., Turner B., Seddon D., Chabaneix N., Girardin C.A.J., Kapos V., Key I., Roe D., Smith A., Woroniecki S., Seddon N. Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation. *Global Change Biology*. 2020. Vol. 26. Issue 11. pp. 6134–6155. DOI: 10.1111/gcb.15310.
16. Esau I., Miles V.V., Davy R., Miles M.W., Kurchatova A. Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2016. Vol. 16. Issue 15. pp. 9563–9577. DOI: 10.5194/acp-16-9563-2016.
17. Malhi G.S., Kaur M., Kaushik P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: a review. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Issue 3. pp. 1318–1339. DOI: 10.3390/su13031318.
18. Mortier S., Hamedpour A., Bussmann B., Wandji R.Ph.T., Latre S., Sigurdsson B.D. et al. Inferring the relationship between soil temperature and the normalized difference vegetation index with machine learning. *Machine Learning*. 2023. 31 p. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2024.102730.
19. Skakun S., Vermote E., Roger J-C., Franch B. Combined use of Landsat-8 and Sentinel-2A images for winter crop mapping and winter wheat yield assessment at regional scale. *AIMS Geosciences*. 2017. Vol. 3. Issue 2. pp. 163–186. DOI: 10.3934/geosci.2017.2.163.
20. Yao Y. Pattern and change of NDVI and their environmental influencing factors for 1986–2019 in the Qinling-Daba Mountains of central China. *Frontiers in Forests and Global Change*. 2024. Vol. 7. Art. No. 1372488. DOI: 10.3389/ffgc.2024.1372488.

УДК 631.4

DOI: 10.46698/VNC.2025.14.61.001

Оригинальная статья

Валовое содержание тяжелых металлов и мышьяка в почвах защитных лесных насаждений сухостепной зоны Волгоградской области

А.В. Федотова[✉], Е.П. Тимофеев[✉]

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, Россия, 400062, г. Волгоград, Университетский пр., 97,
e-mail: timofeev-e@vfanc.ru

Статья поступила: 17.03.2025, доработана: 16.05.2025, принята к публикации: 19.05.2025

Резюме: Актуальность работы. Дефлированные почвы характеризуются поверхностным золовым наносом и могут иметь погребенный профиль. В погребенных гумусовых горизонтах по сравнению с фоновыми почвами прослеживается повышенное содержание поллютантов. Лесные насаждения являются эффективным средством защиты от дефляции, распространенной в районах недостаточного увлажнения. **Целью работы** явилась оценка валового содержания тяжёлых металлов (Pb, Cu, Hg, Zn и As) в почвах лесозащитных насаждений в условиях сухостепной зоны Волгоградской области, а также установление влияния защитных лесополос на накопление и распределение тяжелых металлов в профиле дефлированных почв. **Методы.** Установлена структура почвенного покрова, состоящая из каштановой светлогумусовой почвы с погребенным профилем темно-каштановой почвы и псаммоземов. Дана количественная оценка среднего содержания элементов в почвенном профиле и по слоям 0-10 см, 10-20 см, 20-30 см, 30-40 см, 40-50 см, 50-60 см, 60-70 см. Изучено распределение металлов и мышьяка по почвенному профилю с учетом морфологических особенностей почв. Проведена статистическая обработка результатов. **Результаты исследования.** Установлено влияние гранулометрического состава на степень аккумуляции металлов и мышьяка в почве. Более высокое содержание тонкодисперсных фракций в зональной почве обуславливает большее содержание в ней металлов и мышьяка. Средние выборочные значения элементов (мг/кг) располагались в порядке убывания: для псаммоземов характерен ряд накопления в виде: As<Hg<Pb<Zn<Cu, для почв зонального ряда: As<Hg<Zn<Pb <Cu. Результат исследований указывает, что почвы агролесомелиоративных ландшафтов имеют под лесными насаждениями значительный экологический риск. Поэтому крайне важно разработать новые концепции функционирования агролесомелиоративных систем, адаптированных к условиям сухостепной зоны, с учетом региональных фоновых содержаний тяжелых металлов и мышьяка.

Ключевые слова: почва, сухостепная зона, гранулометрический состав, тяжёлые металлы, мышьяк.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания № FNFE-2025-0012 «Теоретические основы и методология оценки баланса парниковых газов на пресноводных водоемах в засушливых условиях юга России».

Для цитирования: Федотова А.В., Тимофеев Е.П. Валовое содержание тяжелых металлов и мышьяка в почвах защитных лесных насаждений сухостепной зоны Волгоградской области. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 244-254. DOI: 10.46698/VNC.2025.14.61.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.14.61.001

Original paper

Total content of heavy metals and arsenic in soils of protective forest plantations in the dry-steppe zone of Volgograd region

A.V. Fedotova^{ORCID}, E.P. Timofeev^{ORCID}

Federal Research Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences, 97 Universitetskiy Pr., Volgograd 400062, Russian Federation, e-mail: timofeev-e@vfanc.ru

Received: 17.03.2025, revised: 16.05.2025, accepted: 19.05.2025

Abstract: Relevance. Deflated soils are characterized by surface aeolian deposits and may have a buried profile. Buried humus horizons exhibit higher levels of pollutants compared to background soils. Forest plantations are an effective means of protection against deflation, which is widespread in areas with insufficient moisture. **The aim** of the study was to assess the total content of heavy metals (Pb, Cu, Hg, Zn, and As) in soils of protective forest plantations in the dry-steppe zone of the Volgograd region, as well as to determine the influence of shelterbelts on the accumulation and distribution of heavy metals in the profile of deflated soils. **Methods.** The soil cover structure was identified, consisting of light-humus chestnut soil with a buried profile of dark-chestnut soil and psammozems. A quantitative assessment of the average content of elements in the soil profile was carried out for the following layers: 0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm, 30–40 cm, 40–50 cm, 50–60 cm, and 60–70 cm. The distribution of metals and arsenic in the soil profile was studied, taking into account the morphological features of the soils. Statistical processing of the results was performed. **Results.** The influence of granulometric composition on the degree of accumulation of metals and arsenic in the soil was established. A higher content of fine-dispersed fractions in the zonal soil leads to a greater accumulation of metals and arsenic. The average sample values of the elements (mg/kg) were arranged in descending order as follows: for psammozems, the accumulation series was As < Hg < Pb < Zn < Cu, while for zonal soils, it was As < Hg < Zn < Pb < Cu. The results indicate that soils in agroforestry landscapes under forest plantations pose a significant ecological risk. Therefore, it is crucial to develop new concepts for the functioning of agroforestry systems adapted to the conditions of the dry-steppe zone, taking into account regional background levels of heavy metals and arsenic.

Keywords: soil, dry steppe zone, granulometric composition, heavy metals, arsenic.

Acknowledgement: The work was carried out within the framework of the state assignment No. FNFE-2025-0012 “Theoretical bases and methodology of greenhouse gas balance assessment on freshwater reservoirs in arid conditions of southern Russia”.

For citation: Fedotova A.V., Timofeev E.P. Total content of heavy metals and arsenic in soils of protective forest plantations in the dry-steppe zone of Volgograd region. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 244–254. DOI: 10.46698/VNC.2025.14.61.001

Введение

Оценка содержания тяжелых металлов (ТМ) в почве имеет важное значение для определения степени экологического риска и разработки стратегий защиты окружающей среды и здоровья человека [Islam et al., 2024; Wang et al., 2023]. При малой концентрации металлы необходимы живым организмам, поскольку они играют жизненно важную роль в обеспечении физиологических функций, но при высоких концентрациях ТМ становятся токсичными [Gebeyehu, Bayissa, 2020].

По степени опасности воздействия ТМ можно дифференцировать как 1 класс опасности (As, Cd, Hg, Se, Pb, Zn), 2 класс опасности (Co, Ni, Mo, Cu, Sb, Cr) и 3 класс опасности (Ba, V, W, Mn, Sr) [Водяницкий, 2012].

Основным хранилищем ТМ является почва, которая играет основную роль их круговорота в окружающей среде [Cao et al., 2010; Куликова и др., 2022]. Концентрация ТМ в почве зависит от геологических особенностей конкретной территории и имеет значительные диапазоны варьирования [Friedland, 2024].

В засушливых регионах, в качестве мер по борьбе с опустыниванием и деградацией почв в первую очередь от эрозионных процессов, активно применяется фитомелиорация [Ikromov, Kadamov, 2021; Gafurova, Juliev, 2021]. В XIX-XX веках в сухостепной зоне в качестве защиты от наступления песков высаживали лесные массивы, препятствующие дефляционному переносу почвенных частиц [Török et al., 2025]. Лесные массивы, как и лесополосы, имеют положительный противозерозионный ресурс, способствуют формированию локального приземного климатического режима тепла и влажности воздуха, снижают турбулентные потоки парниковых газов, долю углекислого газа в приземном слое воздуха [Толкач, 2022]. Кроме того, лесная растительность способствует стабильности углерода органического вещества почвы, что увеличивает устойчивость экосистем [Tikhonova et al., 2023].

Подобные территории часто используются населением как места для отдыха. Для их благоустройства крайне важна степень загрязнения почв под лесными почвозащитными насаждениями. Рядом исследований [Медведев, Деревягин, 2017; Пугаев, Чегодаева, 2017; Крамерева и др., 2021] показана важная особенность лесных насаждений, проявляющаяся в их способности предотвращать загрязнение почв тяжелыми металлами за счет их профильного перераспределения. Кроме того, в силу перечисленных особенностей, искусственные лесопосадки способствуют частичной рекультивации почв [Горбунова, Куликова, 2022]. Однако отложения ТМ в зоне аэрации могут выступать как источник вторичного загрязнения или геохимического барьера. Для принятия решения о возможности использования территорий в качестве парковых зон необходима оценка экологического состояния почв.

В сухостепной зоне каштановых почв широко применяются восстановительные мероприятия в виде лесомелиорации, где искусственные лесопосадки занимают значительные площади [Попов, 2022]. Возраст некоторых рукотворных лесных массивов превышает 100 лет. Наиболее распространены противодефляционные насаждения, призванные предотвратить наступление песков на населенные пункты. Интенсивная дефляция, в свое время, привела к перекрытию почв зонального ряда песчаным слоем, что способствовало новому эволюционному этапу почвообразования. Своевременная лесомелиорация позволила остановить процесс дальнейшей деградации экосистем, сформировав новые биогеоценозы.

Вызывает интерес современное состояние почв в разрезе содержания тяжелых металлов и мышьяка, особенностей их распределения по профилю с погребенным слоем зональной каштановой почвы под лесозащитными насаждениями сухостепной зоны.

Цель исследований состояла в оценке содержания тяжелых металлов и мышьяка, а также влияния защитных лесополос на накопление и распределение тяжелых металлов в профиле дефлированных почв, северо-запада Приволжской возвышенности.

Материалы и методы исследований

Объектами исследования являлись почвы сухостепной зоны юга Приволжской возвышенности в пределах территории эколого-климатической станции «Камышин» ФНЦ агроэкологии РАН, Волгоградская область.

Климат умеренно-континентальный. Сухостепная зона Камышинского района характеризуется активным ветровым режимом, средний показатель 6-7 м/с достигая в отдельные периоды 25-27 м/с. Средние температуры зимнего сезона держатся в интервале от $-5,1^{\circ}\text{C}$ до $-7,2^{\circ}\text{C}$. В летний период максимальные температуры воздуха могут превышать $+40^{\circ}\text{C}$.

Промышленность г. Камышина является многопрофильной, но наибольшая доля промышленной продукции приходится на предприятия машиностроительной отрасли. Территория исследования расположена в 5 км от промышленного центра г. Камышина, представляет собой сухой сосновый бор на дефляционных песчаных отложениях юга Приволжской возвышенности (искусственные почвозащитные посадки) с древесными породами сосны крымской, дуба черешчатого, клена остролистного, ясеня ланцетного, тополя бальзамического, вяза обыкновенного, ореха грецкого. Возраст насаждений варьирует от 60 до 80 лет.

Почвенный покров характеризуется значительной комплексностью и наличием почв с двучленным профилем в виде задернованного прогумусированного эолового наноса и погребенной темно-каштановой почвы.

Для достижения поставленной цели на территории защитного лесного массива были выбраны пять пробных опытных площадок площадью 50 м^2 . На каждой пробной площадке закладывали три почвенных разреза (один полнопрофильный разрез до глубины 150 см и две почвенные прокопки глубиной 70 см). Всего было изучено 15 разрезов (рис. 1).

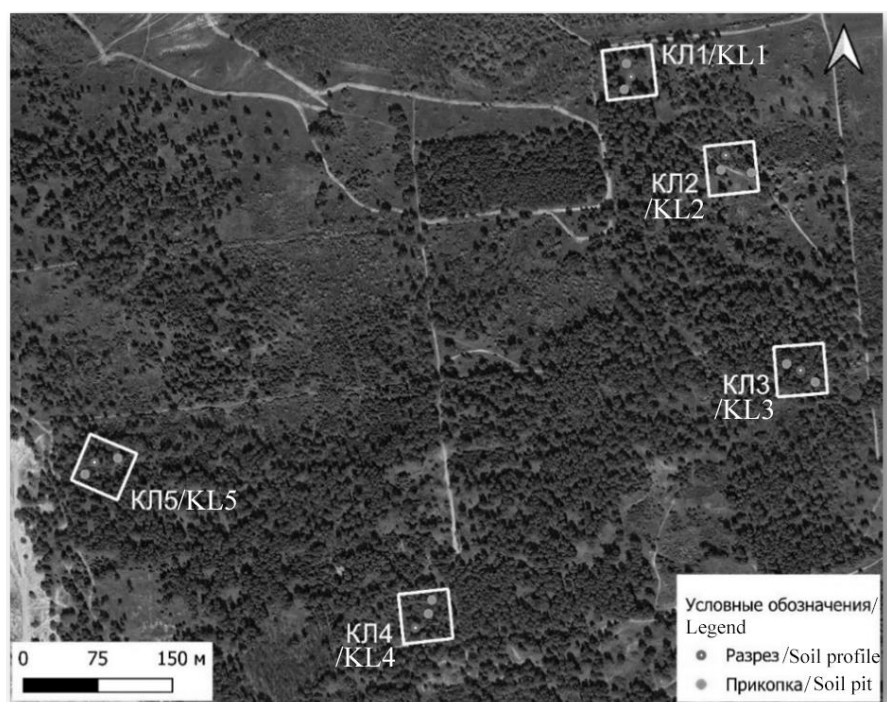


Рис. 1. Схема расположения пробных площадей и мест закладки разрезов /

Fig. 1. Layout of the test areas and cross-section locations

Для каждого почвенного разреза проводили изучение морфологического строения профиля. По особенностям морфологического строения и видовой принадлежности [IUSS Working Group WRB ..., 2022] в целом почвы исследуемой территории представлены двумя группами: 1 группа – зональные каштановые светлогумусовые карбонатные почвы (Greyzemic Kastanozems и Haplic Kastanozems) на погребенной темно-каштановой постагрогенной почве (пробные площади КЛ 1, 2, 3); 2 группа – псаммоземы гумусовые (Eutric Lamellic Arenosols и Eutric Regosols) эолово-аккумулятивных подтипов, представляющие собой молодую почву на эоловых отложениях (пробные площади КЛ 4, 5).

Для определения содержания тяжелых металлов (ТМ) и мышьяка в почве отбирали почвенные пробы по генетическим горизонтам и для уточнения – слоям 0-10 см, 10-20 см, 20-30 см, 30-40 см, 40-50 см, 50-60 см, 60-70 см.

Наиболее простым и доступным методом первичной оценки содержания ТМ и мышьяка в почвах является рентгенофлуоресцентный анализ (РФА), позволяющий проводить оперативный контроль загрязнения почвы.

Оценку содержания металлов и мышьяка в исследуемых почвах выполняли с использованием Спектрометра рентгенофлуоресцентного ЭКРОС XRF-9710. Гранулометрический состав определяли на дифракционном лазерном анализаторе размера частиц «Ласка-ТД». При названии почв по гранулометрическому составу использовали классификацию Качинского [Полевые и лабораторные методы ..., 2001]. Статистическую обработку данных проводили в среде программирования R.

Результаты и их обсуждение

Основными поллютантами в исследованных почвах являются: свинец (Pb), цинк (Zn), мышьяк (As), ртуть (Hg), медь (Cu).

По представленности в почвах для псаммоземов характерен следующий ряд накопления: $As < Hg < Pb < Zn < Cu$, для почв зонального ряда: $As < Hg < Zn < Pb < Cu$. Разница в содержании цинка и свинца в исследованных почвах связана с особенностями взаимодействия их с почвой и содержанием органического вещества. Свинец, по сравнению с цинком, в большинстве присутствует в почве в прочносвязанном состоянии с образованием комплексов с органическим веществом, глинистыми минералами и соединениями оксидов железа и марганца. Подвижность свинца в почве снижается в присутствии органического вещества, за счет чего накопление происходит в слоях с наибольшим содержанием органического вещества. Цинк, напротив, не образует прочных соединений и имеет высокую подвижность по почвенному профилю. Наибольшее представительство отмечено для меди, наименьшее – для мышьяка. Средние величины содержания металлов и мышьяка представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Среднее валовое содержание металлов в почвах (слой 0-70 см) / Average gross metal content in soils (layer 0-70 cm)

Me, мг/кг, Me mg/kg	1 группа / 1 group	2 группа / 2 group
Pb	$8,66 \pm 0,34$	$7,43 \pm 0,18$
Zn	$20,83 \pm 5,39$	$3,03 \pm 1,02$
As	$2,17 \pm 0,84$	$0,07 \pm 0,07$
Hg	$8,60 \pm 1,83$	$0,45 \pm 0,45$
Cu	$22,14 \pm 0,75$	$18,62 \pm 0,68$

Для почв зонального ряда (группа 1) с погребенным профилем темно-каштановой почвы средние выборочные величины содержания тяжелых металлов выше, чем в псаммоземах. Содержание свинца выше на 14%, цинка – на 85%, мышьяка – на 97%, ртути – на 85% и меди – на 16%.

Почвенные свойства влияют на распределение металлов и мышьяка по профилю. Это, в первую очередь, связано с гранулометрическим составом и особенно с содержанием тонкодисперсных частиц.

В таблице 2 представлен гранулометрический состав каштановой почвы (КЛ 1-1) и псаммозема (КЛ 4-2). В профиле псаммозема преобладают песчаные частицы 1,00 – 0,05 мм, доля которых достигает 90% в поверхностном слое. Преобладание песчаной фракции обеспечивает высокую водопроницаемость почвенного профиля. Доля крупной пыли (0,05-0,01 мм) в поверхностном слое 0-20 см составляет 0,6% и с глубины 20 см увеличивается до 8,5%. На фоне достаточно однородного гранулометрического состава выделяется иллювиальный слой 20-30 см, в котором присутствуют тонкодисперсные фракции и доля песка здесь значительно меньше. Морфологическое изучение почвы показало, что с глубины 40 см начинается плотный песчаный слой, представленный неагрегированной массой, являющейся по сути материнской породой.

В профиле каштановой почвы распределение фракций значительно отличается. В поверхностном слое песчаные фракции 1,00 – 0,05 мм составляют 63%, на долю крупной пыли приходится 32%. Такое распределение фракций связано с дефляционными процессами. Содержание илстых частиц мало и незначительно возрастает с глубиной от 1 до 5%, доля мелкого песка уменьшается и значительно возрастает фракция средней и мелкой пыли. Наиболее резкий переход по гранулометрическому составу отмечен с глубины 30 см и приурочен к началу погребенного профиля. По всей видимости, на этой глубине происходит аккумуляция тонкодисперсных частиц из менее плотных вышележащих слоев за счет механического «просеивания» дефляционных наносов.

Таблица 2 / Table 2

**Гранулометрический состав в почвах (слой 0-70 см) /
Granulometric composition in soils (layer 0-70 cm)**

Пробная площадь / Trial area	Слой, см / Layer, cm	Гранулометрический состав, % / Granulometric composition, %					
		1-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001
КЛ 1-1 / KL 1-1	0-10	15,54	47,90	27,26	4,77	3,84	0,69
	10-20	14,13	17,04	17,41	28,76	20,56	2,09
	20-30	17,18	34,16	10,34	20,84	15,68	1,81
	30-40	13,48	17,37	6,52	25,43	31,46	5,74
	40-50	13,48	17,37	6,52	25,43	31,46	5,74
	50-60	15,97	8,21	10,71	27,98	32,9	4,22
	60-70	15,97	8,21	10,71	27,98	32,9	4,22
КЛ 4-2 / KL 4-2	0-10	15,73	83,65	0,62	-	-	-
	10-20	15,73	83,65	0,62	-	-	-
	20-30	8,42	33,20	11,91	25,49	18,64	2,36
	30-40	11,25	80,20	8,55	-	-	-
	40-50	11,25	80,20	8,55	-	-	-
	50-60	11,25	80,20	8,55	-	-	-
	60-70	11,25	80,20	8,55	-	-	-

Примечание: КЛ 1-1 – каштановая почва, КЛ 4-2 – псаммозем. /

Note: KL 1-1 – chestnut soil, KL 4-2 – psammozem.

В почвах зонального ряда (КЛ 1-1) преобладает физическая глина (до 75%). В поверхностном слое зафиксировано наибольшее содержание песчаных частиц (около 60%), что говорит о наличии дефляционных наносов.

Варьирование содержания металлов и мышьяка по почвенному профилю (по средним выборочным) представлено на рисунке 2.

Цинк является микроэлементом, необходимым для роста и развития растений. Дефицит цинка в почвах приводит к снижению продуктивности растений. В больших концентрациях может быть токсичен для живых организмов. ПДК для валового содержания составляет 23 мг/кг. Исследованные почвы зонального ряда характеризуются средним содержанием цинка на уровне 20,83 мг/кг. В отдельном разрезе содержание цинка достигает до 208 мг/кг, что почти в 10 раз превышает ПДК (на графике представлены как выбросы). Цинк был обнаружен лишь в 43 % исследованных образцов зональной почвы. Для псаммоземов обеспеченность цинком значительно ниже, среднее содержание составляет 3,03 мг/кг. Цинк был обнаружен в 20 % образцов почв. Содержание варьирует от 7 до 20 мг/кг. Содержание цинка возрастает с глубиной для всех исследованных почв.

Свинец является одним из приоритетных поллютантов 1-го класса опасности, но в небольших количествах в почве необходим растениям. ПДК для валового содержания в почве составляет 32 мг/кг. Содержание свинца в каштановых почвах варьирует от полного его отсутствия до 16 мг/кг. С глубиной размах значений увеличивается. Среднее содержание составляет 8,66 мг/кг. Свинец обнаружен в 98% почвенных образцов. Среднее содержание свинца в псаммоземах ниже и составляет 7,43 мг/кг при варьировании от 5,7 до 9,6 мг/кг. Присутствие свинца зафиксировано во всех почвенных образцах. Превышения ПДК не зафиксировано.

Ртуть представляет собой один из самых токсичных металлов, который при комплексе факторов окружающей среды может находиться в жидком и парообразном состоянии, что обуславливает его высокую миграционную способность. ПДК содержания в почве – 2,1 мг/кг. В каштановых почвах ртуть присутствовала в 27% проб и повсеместно зафиксировано превышение ПДК. Содержание варьирует от 2,1 до 47,0 мг/кг, при среднем значении – 8,6 мг/кг. Наибольшее содержание отмечено в слое 50-70 см. При исследовании псаммоземов ртуть обнаружена лишь в одной пробе на глубине 20-30 см и содержание составило 19,0 мг/кг, что также превышает ПДК.

Медь является важным микроэлементом для растений, но в высоких концентрациях становится токсичной. ПДК валового содержания меди в почве составляет 55 мг/кг. Среднее содержание меди в каштановых почвах – 22,14 мг/кг, значения варьируют от 14 до 37 мг/кг. Для псаммоземов размах значений от 11 до 28 мг/кг при среднем значении 18,62 мг/кг. Медь обнаружена во всех почвенных пробах. Превышение ПДК не зафиксировано. С глубиной увеличивается разброс значений.

Мышьяк является загрязняющим веществом первого класса опасности. ПДК в почве соответствует 2 мг/кг. Исследования показали, что в каштановой почве мышьяк обнаружен в 46 % проб и содержание его варьирует от 2,2 до 6 мг/кг при среднем значении 2,17 мг/кг. В псаммоземах мышьяк обнаружен в одной пробе на глубине 20-30 см и его содержание составляет 2,9 мг/кг. Во всех пробах содержание мышьяка в почве превышает ПДК и закономерно увеличивается с глубиной.

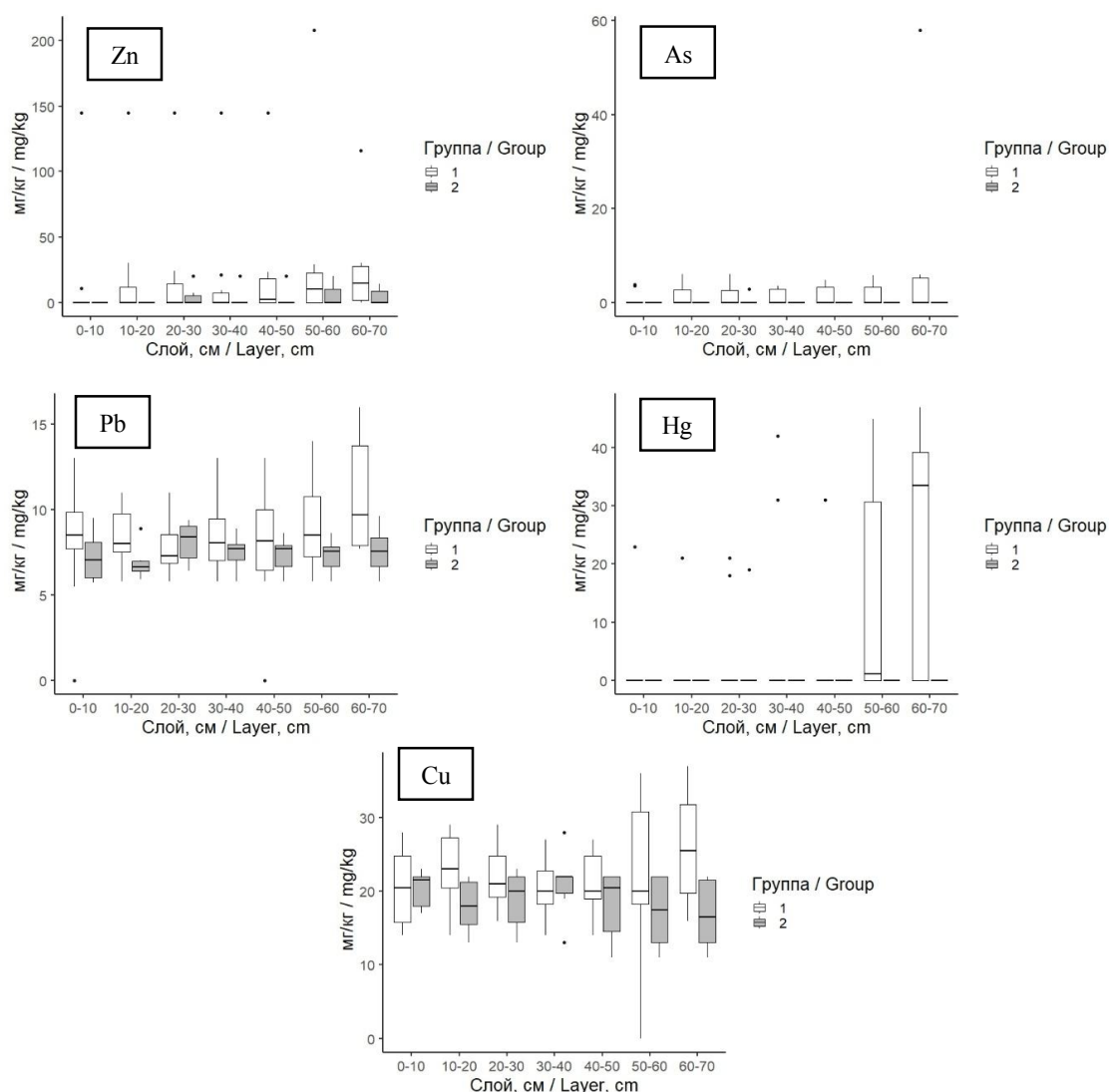


Рис. 2. Диаграммы размаха содержания ТМ и мышьяка в почвенном профиле /

Fig. 2. Diagrams of the range of TM and arsenic content in the soil profile

Анализ полученных результатов показал, что распределение металлов и мышьяка в двух изученных почвенных группах различно. В зависимости от процессов почвообразования происходят изменения в содержании и перераспределении изученных элементов по профилю почвы и дифференциации их с глубиной.

Более высокая доля тонкодисперсных фракций обуславливает большую сорбционную емкость каштановой почвы по сравнению с псаммоземами. Видимое увеличение содержания металлов (Cu, Pb, Hg, Zn) с глубины 50 см, очевидно, связано с многолетней аккумуляцией этих металлов в нижней части профиля погребенной почвы. Наличие исследованных элементов в поверхностном слое почвы позволяет утверждать, что процесс загрязнения продолжается. В каштановых почвах на объекте исследования повсеместно распространены свинец и медь в количествах, не превышающих ПДК. Ареалы почв с содержанием цинка значительно меньше. По отношению к мышьяку это утверждение также справедливо. Для почв Волгоградской области фоновое содержание мышьяка составляет 6,3 мг/кг [Доклад ..., 2024], что превышает фоновые значения, установленные Роскомземом и ПДК.

В псаммоземах вся исследованная территория характеризуется наличием меди в количествах, не превышающих ПДК. Остальные элементы представлены локально.

Выводы

Результаты проведенного исследования содержания Pb, Cu, Hg, Zn и As в сухо-степной зоне Волгоградской области под почвозащитными лесными насаждениями в двух группах почв: зональные каштановые с погребенным профилем темно-каштановой почвы и псаммоземы показали, что в пространственной локализации на объекте исследования наблюдается однородная степень рассеивания Pb и Cu, и сильно неоднородная степень распределения Hg, Zn и As. Отмечено увеличение содержания металлов и мышьяка с глубиной.

Наибольшее содержание металлов и мышьяка под лесными посадками отмечено для каштановых почв в погребенном гумусовом горизонте, что связано с более высоким содержанием тонкодисперсных фракций и повышенным содержанием органического вещества в гумусовом горизонте погребенной темно-каштановой почвы.

В гранулометрическом составе псаммоземов преобладают песчаные фракции, доля которых достигает 90% в поверхностном слое, и содержание изучаемых элементов значительно меньше или отсутствует за счет меньшей адсорбционной способности грубых фракций.

Для почв зонального ряда содержание ТМ и мышьяка превышает аналогичные величины для псаммоземов на 14% для свинца, на 85% для цинка и ртути, на 97% для мышьяка, на 16% для меди, превышая ПДК.

Таким образом, погребенные почвы (гумусовые горизонты) аккумулируют тяжелые металлы и мышьяк, что возможно является косвенным экологическим ущербом, который имеет отложенный эффект.

Литература

1. Водяницкий Ю.Н. Нормативы содержания тяжелых металлов и металлоидов в почвах. // Почвоведение. – 2012. – № 3. – С. 368–375.
2. Горбунова Н.С., Куликова Е.В. Миграционные циклы тяжелых металлов в лесных ландшафтах Каменной степи. // Материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Экология родного края: проблемы и пути их решения». Киров: Вятский государственный университет, 2022. – С. 386–391.
3. Доклад о состоянии окружающей среды Волгоградской области в 2023 году. // Комитет природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Волгоградской области. / Ред. коллегия: Е.П. Православнова, А.В. Лемешкин, Н.В. Петрова, М.А. Мытарев, А.В. Луконина, Е.В. Гугуева, А.Ю. Побежимова, И.Ю. Калюжная, Е.В. Малаева, Н.А. Супрун. – Иркутск: Медиамир, 2024. – 300 с.
4. Крамарева Т.Н., Горбунова Н.С., Куликова Е. В. Миграционные особенности тяжелых металлов в лесных ландшафтах. // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. №. 4(44). – С. 68–78. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/6.
5. Куликова Е.В., Горбунова Н.С., Сафонова А.А. Влияние лесных ландшафтов на миграцию тяжёлых металлов. // Модели и технологии природообустройства: региональный аспект. – 2022. – № 2(15). – С. 10 – 20.
6. Медведев И.Ф., Деревягин С.С. Тяжелые металлы в экосистемах. Саратов: Ракурс, 2017. – 178 с.
7. Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв: Методическое руководство. / Под редакцией Е.В. Шеина. – М.: МГУ, 2001. – 200 с.

8. Попов А.С. Лесомелиорация ландшафтов: учебно-методическое пособие. – Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2022. – 87 с.
9. Пугаев С.В., Чегодаева Н.Д. Влияние полезащитных лесополос на содержание тяжелых металлов в почве лесополосы и прилегающего поля. // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2017. – № 4(59). – С. 39–43.
10. Толкач О.В. Мониторинг распределения по профилю почв сосновых насаждений г. Первоуральска (Свердловская область) ионов меди, свинца и цинка в зоне техногенного воздействия. // Вестник Удмуртского университета. Серия: Биология. Науки о Земле. – 2022. – Т. 32. №. 3. – С. 303–311. DOI: 10.35634/2412-9518-2022-32-3-303-311.
11. Cao H., Chen J., Zhang J., Zhang H., Qiao L., Men Y. Heavy metals in rice and garden vegetables and their potential health risks to inhabitants in the vicinity of an industrial zone in Jiangsu, China. // Journal of Environmental Sciences. – 2010. – Vol. 22. No. 11. – pp. 1792–1799. DOI: 10.1016/S1001-0742(09)60321-1.
12. Friedland A.J. The movement of metals through soils and ecosystems. // Heavy Metal Tolerance in Plants. – CRC Press, 2024. – pp. 7–20.
13. Gafurova L., Juliev M. Soil degradation problems and foreseen solutions in Uzbekistan. // Regenerative Agriculture: What's Missing? What Do We Still Need to Know? – Cham: Springer International Publishing, 2021. – pp. 59–67.
14. Gebeyehu H.R., Bayissa L.D. Levels of heavy metals in soil and vegetables and associated health risks in Mojo area, Ethiopia. // PloS One. – 2020. – Vol. 15. No. 1. Art. No. e0227883.
15. Ikromov I.I., Kadamov A. Agroforestry against wind erosion damage: A Case study in Tajikistan. // Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes. – Cham: Springer International Publishing, 2021. – pp. 693–705.
16. Islam M.S., Hossain Md.K., Phoungthong Kh., Ismail Z. et al. Heavy metals in soil of three agroforestry systems: a preliminary study for source identification and ecological risk. // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. – 2024. – Vol. 104. Issue 20. – pp. 9077–9093.
17. IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS). Vienna, Austria. – 2022. – 236 p.
18. Tikhonova E.N., Gorbunova N., Safonova A., Treschevskaya E., Ye J., Yuan H., Ma Ch. Influence of forest belts on the total content of Pb and Cd and their exchange compounds in leached chernozems. // Forestry Engineering Journal. – 2023. – Vol. 13. No. 1(49). – pp. 257–267. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/17.
19. Török P., Bede-Fazekas Á., Erdős L. European steppes and forest-steppes. // Terrestrial Biomes. – Academic Press, 2025. – pp. 173–185. DOI: 10.1016/B978-0-443-36569-0.00012-4.
20. Wang F., Wang F., Yang H., Yu J., Ni R. Ecological risk assessment based on soil adsorption capacity for heavy metals in Taihu basin, China. // Environmental Pollution. – 2023. – Vol. 316. Art. No. 120608. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120608.

References

1. Vodyanitsky Yu.N. Standards for the content of heavy metals and metalloids in soils. Soil Science. 2012. No. 3. pp. 368–375. (In Russ.)
2. Gorbunova N. S., Kulikova E. V. Migration cycles of heavy metals in forest landscapes of Kamennaya Steppe. In: Materials of XVII All-Russian Sc. and Prac. Conf. Ecology of native land: problems and ways of their solution. Kirov. Vyatka State University. 2022. pp. 386–391. (In Russ.)
3. Report on the state of the environment of Volgograd region in 2023. Irkutsk. Mediamir. 2024. 300 p. (In Russ.)
4. Kramareva T.N., Gorbunova N.S., Kulikova E.V. Migration features of heavy metals in forest landscapes. Forestry Engineering Journal. 2021. Vol. 11. No. 4(44). pp. 68–78. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/6. (In Russ.)

5. Kulikova E.V., Gorbunova N.S., Safonova A.A. Influence of forest landscapes on heavy metal migration. *Models and Technologies of Environmental Engineering: Regional Aspect*. 2022. No. 2(15). pp. 10–20. (In Russ.)
6. Medvedev I.F., Derevyagin S.S. Heavy metals in ecosystems. Saratov. Rakurs. 2017. 178 p. (In Russ.)
7. Field and laboratory methods for studying physical properties and regimes of soils: Methodological guide. Ed. E.V. Shein. Moscow. Moscow State University. 2001. 200 p. (In Russ.)
8. Popov A.S. Forest reclamation of landscapes: study guide. Yekaterinburg. Ural State Forest Engineering University. 2022. 87 p. (In Russ.)
9. Pugaev S.V., Chegodaeva N.D. Influence of shelterbelts on the content of heavy metals in the soil of shelterbelt and adjacent field. *Agricultural Science of Euro-North-East*. 2017. No. 4(59). pp. 39–43. (In Russ.)
10. Tolkach O.V. Monitoring of copper, lead and zinc ions distribution in soil profile of pine plantations in Pervouralsk (Sverdlovsk region) under technogenic impact. *Bulletin of Udmurt University. Biology. Earth Sciences Series*. 2022. Vol. 32. No. 3. pp. 303–311. DOI: 10.35634/2412-9518-2022-32-3-303-311. (In Russ.)
11. Cao H., Chen J., Zhang J., Zhang H., Qiao L., Men Y. Heavy metals in rice and garden vegetables and their potential health risks to inhabitants in the vicinity of an industrial zone in Jiangsu, China. *Journal of Environmental Sciences*. 2010. Vol. 22. No. 11. pp. 1792–1799. DOI: 10.1016/S1001-0742(09)60321-1.
12. Friedland A.J. The movement of metals through soils and ecosystems. *Heavy Metal Tolerance in Plants*. CRC Press. 2024. pp. 7–20.
13. Gafurova L., Juliev M. Soil degradation problems and foreseen solutions in Uzbekistan. *Regenerative Agriculture: What's Missing? What Do We Still Need to Know?* Cham. Springer. 2021. pp. 59–67.
14. Gebeyehu H.R., Bayissa L.D. Levels of heavy metals in soil and vegetables and associated health risks in Mojo area, Ethiopia. *PloS One*. 2020. Vol. 15. No. 1. Art. No. e0227883. DOI: 10.1371/journal.pone.0227883.
15. Ikromov I.I., Kadamov A. Agroforestry against wind erosion damage: A case study in Tajikistan. *Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes*. Cham. Springer. 2021. pp. 693–705.
16. Islam M.S., Hossain Md.K., Phoungthong Kh., Ismail Z. et al. Heavy metals in soil of three agroforestry systems: a preliminary study for source identification and ecological risk. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2024. Vol. 104. No. 20. pp. 9077–9093.
17. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. Vienna. International Union of Soil Sciences. 2022. 236 p.
18. Tikhonova E.N., Gorbunova N., Safonova A., Treschevskaya E., Ye J., Yuan H., Ma Ch. Influence of forest belts on the total content of Pb and Cd and their exchange compounds in leached chernozems. *Forestry Engineering Journal*. 2023. Vol. 13. No. 1(49). pp. 257–267. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/17.
19. Török P., Bede-Fazekas Á., Erdős L. European steppes and forest-steppes. *Terrestrial Biomes*. Academic Press. 2025. pp. 173–185. DOI: 10.1016/B978-0-443-36569-0.00012-4.
20. Wang F., Wang F., Yang H., Yu J., Ni R. Ecological risk assessment based on soil adsorption capacity for heavy metals in Taihu basin, China. *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 316. Art. No. 120608. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120608.

Юбилей Сергея Григорьевича Парады



16 апреля 2025 года исполнилось 75 лет со дня рождения известного российского ученого, доктора геолого-минералогических наук, профессора, специалиста в области геологии и рудных месторождений и металлогении, автора более 180 научных и учебно-методических работ, в том числе 2 монографий и 1 справочника С.Г. Парады.

Сергей Григорьевич Парада родился 16 апреля 1950 г. в г. Батайске, Ростовской области.

С 1968 по 1970 гг. служил в рядах Советской армии. В 1975 г. окончил с отличием Ростовский государственный университет по специальности «Геологическая съемка, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых».

В 1975 г. по распределению был направлен на работу в Дальневосточный институт минерального сырья Мингео СССР (г. Хабаровск), где работал в должностях ст. инженера, м. н. с., с. н. с., ведущего специалиста. В этот период участвовал в тематических работах по изучению месторождений полезных ископаемых в т.ч. в качестве начальника полевого отряда, ответственного исполнителя и руководителя НИР, был Ученым секретарем научно-методического совета и Ученого совета института. Имеет благодарности и почетные грамоты.

С 1981 г. работал в ПО «Приморзолото» в должности начальника участка, где занимался организацией геологоразведочных работ и отработки россыпных месторождений золота в Хабаровском крае, поисковой оценки Маломырского золоторудного месторождения в Амурской области. Его труд отмечался благодарностями, почетными грамотами. За открытие россыпного месторождения золота в Хабаровском крае награжден Премией Всесоюзного научно-технического горного общества.

С 1986 г. С.Г. Парада руководил поисковыми и геологоразведочными работами в Социалистической Республике Вьетнам (СРВ) в должности главного инженера-геолога экспедиции №1 Главного горно-геологического управления СРВ. За эффективное ведение работ в 1987 г. награжден медалью Правительства СРВ.

В 1989 г. он был назначен деканом Факультета повышения квалификации руководящих работников и специалистов Министерства геологии СССР. В 1991 г. (и в 1996 г. повторно) избран деканом геолого-географического факультета Ростовского госуниверситета (РГУ). В РГУ С.Г. Парада прошел все ступени от преподавателя до профессора. В этот период он является Председателем Ученого совета факультета, членом Президиума УМО Университетов России, членом Межведомственной (Ми-

нообразования и Министерства природных ресурсов) комиссии по геологическому образованию, членом Ученого совета РГУ. В качестве декана геолого-географического факультета РГУ организовал открытие 3-х новых специальностей, удвоил набор студентов, увеличил штаты профессорско-преподавательского состава и учебно-вспомогательного персонала. За большой вклад в подготовку высококвалифицированных специалистов дважды (1995 и 2000 гг.) награждался Почетной грамотой Министерства образования РФ.

С 2002 по 2006 годы С.Г. Парада с группой студентов РГУ участвует в научном обеспечении поисковых работ на платину и золото в Хабаровском крае. Он обосновывает необходимость проведения поисковых работ на считавшемся ранее бесперспективном участке, в результате чего в 2005 г. при непосредственном его участии открыто и в дальнейшем разведано крупное месторождение золота Перевальное.

С 2007 г. С.Г. Парада проводит работы по научному обеспечению поисков и оценки месторождений золота и цветных металлов на Юге России. За эффективную помощь производственным организациям при проведении поисковых работ в 2008 году награжден Почетной грамотой Министерства природных ресурсов РФ.

С 2008 г. С.Г. Парада работает заведующим отделом геологии, нефтегазовых и водных ресурсов Южного научного центра РАН, является заместителем Председателя ЮНЦ РАН.

С 2016 г. работает по совместительству в Геофизическом институте ВНЦ РАН в должности главного научного сотрудника.



Научно-исследовательская деятельность С.Г. Парады посвящена проблемам изучения металлогенического потенциала регионов Северного Кавказа и Донбасса. Им обоснована концепция рудоподготовительных систем, объясняющая связь крупнообъемных золоторудных месторождений с черносланцевыми комплексами, разработаны литогенетические модели таких систем, определяющих минеральный тип золоторудных минерализаций в черносланцевых комплексах. Впервые выявлены геодинамические обстановки развития Восточного Донбасса в мезозое, об-

условленные субдукцией и последующим скольжением литосферных плит, и связанные с этим особенности магматизма и оруденения. Показано, что основные металлогенические факторы, представленные интрузивным магматизмом надсубдукционного типа, сменяющегося во времени магматизмом скольжения литосферных плит, складчатыми и разрывными структурами отображаются в разнопорядковых гравитационных и магнитных аномалиях, что позволяет значительно шире использовать геофизические методы при металлогеническом анализе Донбасса.

В 2009 г. С.Г. Парада научно обосновал возможность открытия золотого оруденения на Северном фланге Тырныаузского рудного узла, составил проект производства поисковых работ на рудное золото. В результате реализации этого проекта в 2009–2011 гг. под его руководством и при непосредственном участии открыто первое на Северном Кавказе крупное золоторудное месторождение скарнового типа. В связи с чем в 2011 г. он награжден нагрудным знаком «Отличник разведки недр» Министерства природных ресурсов РФ.

С.Г. Парада руководит аспирантурой по специальности 25.00.11 – геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения. Под его руководством защищено 5 кандидатских диссертаций. Являлся членом Совета по защите докторских диссертаций 99.0.075.03 (Д 999.228.03).

С.Г. Парада – член редколлегии научных журналов «Геология и геофизика Юга России» (индексируемого в Scopus и в RSCI), «Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» и «Наука Юга России», индексируемых в RSCI; является экспертом РАН (сертификат 2016-01-5464-1119), экспертом научно-технической сферы Минобрнауки РФ (свидетельство № 8859), дважды награждался Почетными грамотами РАН.

Коллектив Геофизического института ВНЦ РАН горячо поздравляет Сергея Григорьевича Параду со знаменательным событием – 75-летним юбилеем и желает ему крепкого здоровья, долгих лет жизни и хороших радостных дней! Пожелаем ему и в дальнейшем жить активной научной, общественной жизнью, и еще многое реализовать из задуманного им на благо России!

Главный редактор

В.Б. Заалишвили

Юбилей Анатолия Ивановича Гавришина



Доктору геолого-минералогических наук, профессору Гавришину Анатолию Ивановичу 15 июля 2025 года исполняется 85 лет.

Гавришин Анатолий Иванович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная геология» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, академик РАЕН и РАЕ.

А.И. Гавришин родился 15 июля 1940 г. на Дону в семье горного инженера, закончил с серебряной медалью среднюю школу № 3 г. Новочеркасска и в 1962 г. – с отличием Новочеркасский политехнический институт. В студенческие годы активно сотрудничал в институтской многотиражке (более 100 публикаций) и литературной группе.

Свой трудовой путь А. И. Гавришин начал в Центральной Геохимической партии «Уралгеолуправления» (г. Свердловск). Он

выполнял работы по обобщению гидрогеохимических данных по Уральскому региону, осуществлял геохимические поиски месторождений в регионе и стал соавтором оригинальной «Прогнозной геохимической карты Урала». В 1966–1970 гг. он обучался в заочной аспирантуре НПИ и защитил кандидатскую диссертацию. С 1971 г. А.И. Гавришин по конкурсу перешел работать в ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова.

А.И. Гавришин – крупный, известный в России и за рубежом ученый в области математической геологии, гидрогеохимии и проблем окружающей среды. Им впервые в мировой практике развиты и обобщены основы учения о качестве геохимической информации, выведен новый статистический критерий «зет-квадрат» (z^2) и реализованы цифровые компьютерные технологии классификации многомерных наблюдений (G-метод), которые являются важным элементом искусственного интеллекта.

Результаты его исследований представлены более чем в 400-х научных и учебно-методических публикациях, в том числе в 20 монографиях, учебных пособиях, брошюрах и более чем в 300-х докладах на научных конференциях (94 международных). Более 100 работ опубликовано им в России и за рубежом в соавторстве с зарубежными коллегами (Италия, Франция, США, Германия) при обобщении ги-

дрогологических, космохимических, астрофизических, дистанционных и других видов данных по Земле, Луне, Марсу, Юпитеру, кометам, астероидам и дальнему космосу.

Книги А.И. Гавришина были представлены и награждены золотыми медалями на международных книжных выставках во Франкфурте-на-Майне, Москве (2), Париже, Барселоне, Нью-Йорке, Вене, Гонконге (КНР) и др.

А.И. Гавришин прошел годичную научную стажировку в Римском университете и им выполнен цикл исследований в рамках международного 30-летнего научно-технического сотрудничества с Астрофизическим институтом и Институтом физики межпланетного космического пространства (Италия, Рим). Им изучены и описаны гидрогеохимические закономерности формирования поверхностных, подземных и шахтных вод Восточного Донбасса и перспективы обнаружения нефтегазовых скоплений в регионе. Он известен как ответственный редактор 18-ти межвузовских сборников научных трудов и член редколлегии журналов «Успехи современного естествознания», «Современные наукоемкие технологии» и «Journal of Advances in Applied & Computational Mathematics».

За успехи в научно-педагогической деятельности А.И. Гавришин отмечен отечественными и зарубежными наградами и званиями. Ему присвоено 24 почетных и научных звания: Заслуженный работник ВО РФ, Заслуженный деятель науки и образования РФ, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Отличник разведки недр, Заслуженный профессор ЮРГПУ (НПИ), Лауреат премии им. Н.Н. Зинина и др.

Он награжден 20 орденами и медалями: медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени; Золотой медалью «За выдающиеся достижения – Gold Medal for Exceptional Achievements» (Бельгия); орденом «Трудом и знанием – Labore et Scientia» (Европейский Научно-промышленный Консорциум), орденом «Петр Великий – Peter the Great», орденом «Александр Великий – Alexander the Great», золотой медалью «Европейское Качество – European Quality», медалью «Вильгельм Лейбниц – Wilhelm Leibniz», «Золотой медалью им. В.И. Вернадского» и др.

Научная биография А.И. Гавришина опубликована во многих изданиях: «Геологи Нижнего Дона», «Энциклопедия г. Новочеркасска», «Ученые России», «Ученые России – Интернет-энциклопедия»: www.famous-scientists.ru/, Всемирная энциклопедия «Who is Who in the World – Кто есть кто в Море» и других.

В последнее время А.И. Гавришин большое внимание уделяет проблемам влияния микроэлементного состава реголитов на здоровье будущих колонистов на Луне и публикации мемуаров («Мемуары юмориста», «Юношеская сага» и «Итальянская эпопея» М.: ДеЛибри. 2024).

Коллеги, ученики и друзья поздравляют Анатолия Ивановича Гавришина с юбилеем и желают крепкого здоровья и новых творческих успехов!

От имени и по поручению коллектива кафедры «Прикладная геология» ЮРГПУ (НПИ).

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

В журнале «Геология и геофизика Юга России» публикуются оригинальные статьи теоретического и методического характера по вопросам геологии, геофизики и геохимии, результаты изучения состава и строения коры и мантии Земли, процессов формирования и общих закономерностей размещения полезных ископаемых, а также результаты разработки и применения геолого-геофизических методов их выявления. Тематика журнала соответствует следующим областям знаний по действующей номенклатуре ВАК: 1.6.1 Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика; 1.6.4 Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых; 1.6.6 Гидрогеология; 1.6.9 Геофизика; 1.6.10 Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения; 1.6.11 Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений; 1.6.12 Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов; 1.6.20 Геоинформатика, картография; 1.6.21 Геоэкология; 2.8.6 Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика; 2.8.8 Геотехнология, горные машины, а также смежным научным направлениям.

Для работ регионального характера предпочтение отдается статьям, раскрывающим различные вопросы геологического строения Юга России и прилегающих территорий.

В соответствии с градацией наук, принятой в международных системах цитирования Scopus и Web of Science статьи для публикации в журнале «Геология и геофизика Юга России» принимаются по следующим отраслям и группам наук:

1. Earth and Planetary Sciences (**науки о Земле и планетарные науки**);
2. Environmental Science (**наука об окружающей среде**).

В журнале «Геология и геофизика Юга России» печатаются:

- статьи с изложением новых научных результатов, объемом не более 10 машинописных страниц, включая иллюстрации и таблицы;
- краткие сообщения, содержащие информацию о важных результатах предварительных исследований, объемом 3–5 страниц (эти материалы впоследствии могут использоваться в тексте полной статьи);
- обзоры печатных работ по актуальным геолого-геофизическим и экологическим проблемам Юга России и прилегающих территорий, объемом 20–25 страниц по заказу редакции.

Все работы должны соответствовать тематике журнала. Предоставленные рукописи проходят этапы предварительного и итогового рецензирования, и в случае необходимости, направляются авторам на исправление и доработку. Рукописи в журнале публикуются на русском либо английском языках, резюме (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 <https://www.geosouth.ru> или по почте на адрес Издательства: 362002, Россия, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, редакция журнала «Геология и геофизика Юга России».

В редакцию необходимо предоставить следующие материалы:

- статья (структуру и правила оформления см. ниже);
- на отдельной странице: сведения об авторах, содержащие фамилию, имя, отчество, ученую степень, звание, название организации, служебный и домашний адрес и телефоны, e-mail и указание, с кем из авторов предпочтительнее вести переписку;
- направление от организации, если предоставляемые материалы являются результатом работы, выполненной в этой организации; в направлении следует указать название рубрики журнала;
- экспертное заключение или другой документ, разрешающий опубликование в открытой печати, утвержденные руководителем организации и заверенные гербовой печатью (представляют только авторы из России).

Если материалы подаются посредством электронного сервиса, бумажные экземпляры рукописи в редакцию предоставлять не требуется. При онлайн регистрации необходимо руководствоваться пошаговыми инструкциями по загрузке файлов. При отправке материалов почтой необходимо приложить два бумажных экземпляра статьи, подписанных всеми авторами. Подготовленный в соответствии с общими техническими требованиями текст печатается на одной стороне листа формата А4. Резюме (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 (кегль 14 полужирный, выравнивание по центру), название учреждения, почтовый адрес, город, страна представляющих рукопись для опубликования. Указать e-mail для переписки и ответственного автора.

Резюме (аннотация) должна быть объемом 250-300 слов. В ней не рекомендуется использовать формулы и ссылки на литературу. Если рукопись подается на русском языке, то резюме (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 резюме (аннотацию) на русском. Резюме (аннотация) печатается шрифтом Times New Roman (12 кегль). В конце резюме (аннотации) обязательно указываются ключевые слова (5-8), которые отражают тематику статьи.

Благодарности/Acknowledgements. В этом разделе следует упоминать людей, которые помогали при работе над статьей; источники финансирования.

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 $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, $\cos$, $\sin$, $\cos$, $\min$, $\max$ и т.п. набираются прямым шрифтом. Символ не должен сливаться с надсимвольным элементом в химических элементах (H_2O) и единицах измерений (MBt/cm^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 (ноль) 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 и собственные заголовки. Названия всех рисунков, фотографий и таблиц приводятся на русском языке 11 кеглем, курсивом. Все надписи на русском языке на рисунках и в таблицах дублируются на английский. Нумерация обозначений на рисунках дается по порядку номеров по часовой стрелке или сверху вниз. Рисунки необходимо по возможности выполнять в векторном формате, 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, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, Геофизический институт ВНИЦ РАН, Редакция журнала «Геология и геофизика Юга России». Тел: 8 (8672) 76-19-28; факс: 8 (8672) 76-40-56, e-mail: southgeo@mail.ru

INFORMATION FOR AUTHORS

The journal «Geology and Geophysics of Russian South» publishes original articles of theoretical and methodological nature on geology, geophysics and geochemistry, the results of studying the composition and structure of the Earth's crust and mantle, the formation processes and the general patterns of mineral resources, geophysical methods for their detection. The subject of the journal corresponds to the current nomenclature areas of knowledge of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation: 1.6.1 General and regional geology. Geotectonics and geodynamics; 1.6.4 Mineralogy, crystallography. Geochemistry, geochemical methods of prospecting for minerals; 1.6.6 Hydrogeology; 1.6.9 Geophysics; 1.6.10 Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny; 1.6.11 Geology, prospecting, exploration and exploitation of oil and gas fields; 1.6.12 Physical geography and biogeography, soil geography and landscape geochemistry; 1.6.20 Geoinformatics, cartography; 1.6.21 Geoecology; 2.8.6 Geomechanics, rock destruction, mine aerogas dynamics and mining thermal physics; 2.8.8 Geotechnology, mining machines and related scientific directions.

For works of a regional nature, preference is given to articles that reveal the various issues of the geological structure of the South of Russia and adjacent territories.

According to the gradation of Sciences accepted in the international citation systems Scopus and Web of Science articles for publication in the journal “Geology and Geophysics of the South of Russia” are accepted by the following branches and groups of Sciences:

1. Earth and Planetary Sciences;
2. Environmental Science.

The journal «Geology and Geophysics of Russian South» publishes:

– articles interpreting the new scientific research results of volume not more than 10 typewritten pages including illustrations and tables;

- brief messages containing information on the important results of the preliminary research of volume 3-5 pages (these materials can be used in the full article text);
- reviews of the typewritten articles on the actual problems on current geological, geophysical and environmental problems of the South of Russia and adjacent territories, volume 20-25 pages by the editor's order.

All papers must correspond to the journal theme. The presented manuscripts pass the preliminary and total reading stages and if necessary are sent back to the authors for the correction and finishing. The manuscripts are published in Russian and in English, the abstracts in Russian and in English as well. The journal publishes only the original articles. The author is fully responsible for the requirement. The manuscripts are not returned to the authors in case of being rejected in publication. The editor also does not return the materials sent. The editor has a right to make reductions and corrections of the article text. All corrections in the text and figures can be done by the authors only at the stage of the typesetting preparations. The infringement of the manuscript submission guidelines will lead to the article rejection. The publication is free of charge for authors of papers written by request of the publisher, and for graduate students. Reprinting is allowed only with the editorship permission with the obligatory references to the journal «Geology and Geophysics of Russian South».

Instructions for the authors

Acceptance of materials for consideration is carried out through the electronic service <https://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 (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 (in Russian and in English). Keywords (5-8) that reflect the theme of the article must be specified at the end of the abstract.

The article text is typed in Times New Roman (14 pt) through an ordinary interval aligning along the format. A subtitle is typed in italics, aligning along the left edge. The common terms, measurement units and conventional symbols similar to the whole article are used. The decoding of all symbols is given for the first text use. The Latin alphabet letters are typed in the italics while the Greek letters in the straight type. The mathematical symbols $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, $\cos$, $\sin$, $\min$, $\max$, etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements (H_2O) and measurement units (MW/cm^2) and must be of the straight (ordinary) type. One shouldn't mix similar written letters of the Latin, Greek and Russian alphabets and should use the proper macros. The letters I and J, v and ν , e and l, h and n, q and g, V and U, O (letter) and 0 (zero) must differ in inscribing. There must be a sign of the continuous gap between a value figure meaning and its dimension. The hyphen is not used; the gap character also mustn't be used in the text for the lay-out. The formulas are designed with the help of the built-in formulas processor (Microsoft Equation), the enumeration being done in the round brackets (2), aligned along the right edge; the decoding of all signs (letters) in the formulas is given in the order of the formula reference. To avoid the errors and misunderstandings, the editorial staff recommends the authors to use the Latin, Greek and other (not Russian) alphabet letters in the formulas and to keep to the omission sizes while the formulas printing. Large formulas must be divided into separate fragments. If possible, the fragments must be independent; each line is a separate object. The enumeration and punctuation marks should be put into an ordinary text separately from the formulas. The tables, pictures and photos are placed inside the text and must have a through numeration along the text 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 Str., Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal «Geology and Geophysics of Russian South». Phone +7 (8672) 76-19-28; fax: +7 (8672) 76 40 56, e-mail: southgeo@mail.ru

**ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА
ЮГА РОССИИ
(№ 2. 2025 г. Том 15)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 26.06.2025 г. Дата фактического выхода 30.06.2025 г.

Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.

Гарнитура «Times». Усл. печ. лист 31,0.

Тираж 100 экз. Заказ № 81.

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.

362002, г. Владикавказ, пер. Павловский, 3