

ISSN 2221-3198

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 1 / 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
№ 1 / 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**, Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ответственный секретарь

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

Выпускающий редактор

д.г.-м.н., проф. **С.Г. Парада**

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

Журнал включен в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus

Журнал издается с 2011 года.

Периодичность издания – 4 номера в год

Учредитель:

ВНЦ РАН

Адрес учредителя:

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

Тел.: 8(8672)726788

e-mail: info@vncran.ru

<http://vncran.ru>

Издатель:

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук

Адрес издателя и редакции:

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

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

e-mail: southgeo@mail.ru

<http://geosouth.ru>

ISSN 2221-3198

e-ISSN 2686-7486

Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 29119

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

© Геофизический институт ВНЦ РАН, 2025

Фото на обложке – Казбек весной (К.С. Харебов)

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

Editor in Chief

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

Deputy Editor in Chief

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

Members of Editorial board

Vladimir A. Babeshko, Academician of RAS, Southern
Scientific Center of RAS, Rostov-on-Don,
Russian Federation

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

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

Tamaz L. Chelidze, Academician of Georgian National
Academy of Sciences (GNAS), M. Nodia Institute
of Geophysics, Georgia

Gurban D. Yetirmishli, Academician of Azerbaijan
National Academy of Sciences (ANAS), Republican
Seismic Survey Center of ANAS, Azerbaijan

David R. Kaplunov, Corresponding Member of RAS,
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral
Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian
Federation

Sevada M. Hovhannisyan, Academician of National
Academy of Sciences of the Republic of Armenia
(NAS RA) A. Nazarov Institute of Geophysics and
Engineering Seismology of NAS RA, Armenia

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

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

Igor A. Beresnev, Ph.D., Iowa State University, USA

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

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

Aleksey N. Gunya, Dr. Sci. (Geogr.), Institute of
Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow
Kuo-Liang Wen, Ph. D., Prof., National Central University,
Taiwan

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

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

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

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

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

Valeriy V. Stogny, Dr. Sci. (Geol.Min.), Prof., Geophysical
Institute – the Affiliate of Vladikavkaz Scientific Center,
RAS, Vladikavkaz

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

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

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

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

Executive Secretary

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

Managing Editor

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

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

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

The Journal is published since 2011.

Frequency of publication – 4 issues per year

Founder:

Vladikavkaz Scientific 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 – Kazbek in spring (K.S. Kharebov)

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕКТНИКА И ГЕОДИНАМИКА

Попков В.И., Попков И.В. Характер сочленения Северо-Устьюртского докембрийского массива и раннекиммерийской Центрально-Мангышлакской системы дислокаций.....	6
Стогний В.В., Стогний Г.А. Глубинное строение Станового мегаблока Алдано-Станового щита (по данным опорных профилей 3-ДВ и 8-ДВ)	18
Юрков А.К., Заалишвили В.Б., Козлова И.А., Бирюлин С.В., Мельков Д.А., Бутанаев Ю.В., Рычкова К.М., Имашев С.А., Лазарева Е.А., Каменев П.А. Особенности проведения радонового мониторинга в режиме принудительной доставки почвенного воздуха к детектору в регионах с различными геодинамическими условиями	32

ГЕОФИЗИКА

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	45
Голик В.И. Сейсмотеопасные технологии подземной разработки рудных месторождений	56
Дмитриева И.Ю., Габсатарова И.П., Саяпина А.А., Багаева С.С., Гайсумов М.Я. Землетрясение 12.12.2020 г. с $M_w=4,8$ в очаговой зоне сильного Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. с $M_w=6,4$ на Восточном Кавказе	65
Идармачев Ш.Г. Система непрерывного мониторинга параметров трещин в горном массиве на основе резистивных датчиков	82
Силачева Н.В., Кудабаяева А.Д. Оценка сейсмической опасности территорий Казахстана на примере Жамбылской области.....	92
Babayev T.H., Aliyev Y.N., Babayev G.R. Clustering analysis of 100-year international seismic catalogue for Azerbaijan	105

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Ермаков Ю.А., Самсонов А.А., Старостин В.И., Мамаев И.П., Шалимов В.Д. Корреляционный метод подсчета ресурсов редкоземельных элементов на Камыш-Бурунском железорудном месторождении Керченского бассейна	119
Парада С.Г. Металлогенический аспект распределения золота во вторичных ореолах рассеяния восточной части Передового хребта	132
Юсупов А.Р., Мамаев С.А., Атаев З.В. Адсорбционные свойства цеолитсодержащих кремнисто-карбонатных пород Дагестана	141

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Сикорская С.В. Закономерности размещения и условия формирования залежей углеводородов Северо-Донбасского газоносного района.....	151
--	-----

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Архипова О.Е., Мисиров С.А. Оценка рекреационной привлекательности Восточного Приазовья.....	166
Забураева Х.Ш., Шаипова А.А. Горные регионы России как центры развития экологического туризма	180
Клюев Р.В., Заалишвили В.Б., Музаев И.Д., Гаврилова А.А. Режим работы в бассейне выдержки Билибинской атомной электростанции при реализации различных неблагоприятных сценариев	194
Корецкий Н.А., Горбунов А.С., Бевз В.Н., Караваев В.А., Моделирование овражной эрозии методом сглаженной многоуровневой оценки	208

CONTENTS

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

Popkov V.I., Popkov I.V.

- The nature of the junction of the North Ustyurt Precambrian massif and the early Cimmerian Central Mangyshlak dislocation system 6

Stogny V.V., Stogny G.A.

- Deep structure of the Stanovoy megablock of the Aldan-Stanovoy shield (according to the data of reference profiles 3-DV and 8-DV) 18

Yurkov A.K., Zaalishvili V.B., Kozlova I.A., Biryulin S.V., Melkov D.A., Butanaev Yu.V., Rychkova K.M., Imashev S.A., Lazareva E.A., Kamenev P.A.

- Features of radon monitoring in the mode of forced delivery of soil air to the detector in the regions with different geodynamic conditions 32

GEOPHYSICS

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 45

Golik V.I.

- Earthquake safe technologies of underground mining of ore deposits 56

Dmitrieva I.Yu., Gabsatarova I.P., Sayapina A.A., Bagaeva S.S., Gaisumov M.Ya.

- Earthquake on 12.12.2020 with $M_w=4.8$ in the focal zone of the strong Chernogorsky earthquake on 07.28.1976 with $M_w=6.4$ in the Eastern Caucasus 65

Idarmachev Sh.G.

- The system of continuous monitoring of parameters of cracks in a mountain range on the basis of resistive sensors 82

Silacheva N.V., Kudabayeva A.D.

- Seismic hazard assessment of Kazakhstan territory on the example of Zhambyl region 92

Babayev T.H., Aliyev Y.N., Babayev G.R.

- Clustering analysis of 100-year international seismic catalogue for Azerbaijan 105

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY

Yermakov Yu.A., Samsonov A.A., Starostin V.I., Mamaev I.P., Shalimov V.D.

- A correlation method for calculating rare earth element resources at the Kamysh-Burunsky iron ore deposit in the Kerch basin 119

Parada S.G.

- Metallogenic aspect of gold distribution in the secondary scattering halos of the eastern part of the Forward Ridge 132

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

- Adsorption properties of zeolite-containing siliceous-carbonate rocks of Dagestan 141

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF OIL AND GAS FIELDS

Sikorskaya S.V.

- The patterns of hydrocarbon deposits distribution and conditions of their formation in the North-Donbass gas and oil-bearing region 151

GEOECOLOGY

Arkhipova O.E., Misirov S.A.

- Assessment of the recreational attractiveness of the Eastern Azov region 166

Zaburaeva Kh.Sh., Shaipova A.A.

- Mountain regions of Russia as centers for the development of ecological tourism 180

Klyuev R.V., Zaalishvili V.B., Muzaev I.D., Gavrilova A.A.

- Operation mode in the spent fuel pool of the Bilibino nuclear power plant under the implementation of various unfavorable scenarios 194

Koretsky N.A., Gorbunov A.S., Bezv V.N., Karavaev V.A.

- Modeling of gully erosion by the method of smoothed multilevel estimation 208

УДК: 551.24

DOI: 10.46698/VNC.2025.63.47.001

Оригинальная статья

Характер сочленения Северо-Устьюртского докембрийского массива и раннекиммерийской Центрально-Мангышлакской системы дислокаций

В.И. Попков , И.В. Попков 

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

Статья поступила: 21.01.2025, доработана: 20.02.2025, принята к публикации: 21.02.2025

Резюме: Актуальность работы. Центрально-Мангышлакская система дислокаций и Северо-Устьюртский докембрийский массив играют определяющую роль в региональной структуре запада Туранской плиты. Слагающие Центрально-Мангышлакскую систему дислокаций отложения пермо-триаса претерпели интенсивные деформации на рубеже триаса и юры, в то время как в пределах Северного Устьюрта они входят в состав чехла древнего массива. Выяснение особенностей строения зоны сочленения этих крупных структурных элементов позволяет получить дополнительную информацию о геодинамической обстановке формирования молодой платформы, а также может способствовать решению некоторых нефтегеологических задач, поскольку в их пределах открыты скопления нефти и газа. **Цель исследований.** Раскрытие особенностей строения зоны сочленения Центрально-Мангышлакской раннекиммерийской складчатой системы с докембрийским Северо-Устьюртским массивом. **Методы исследования.** Для решения поставленной задачи выполнен комплексный анализ материалов сейсморазведки, высокоточной аэромагнитной съемки масштаба 1:50 000, глубокого бурения, изучен керновый материал. Интерпретация временных разрезов позволила получить информацию о морфологии складчатых дислокаций и кинематике разрывов. Произведена корреляция разрезов скважин. Применены методы структурного анализа. **Результаты работы.** Установлен надвиговый характер сочленения Северо-Устьюртского докембрийского массива и Центрально-Мангышлакской системы дислокаций. Оценена горизонтальная амплитуда надвижения пермо-триасового складчатого комплекса на разновозрастные отложения Северного Устьюрта, достигающая 15-20 км. Тангенциальные напряжения транслировались также и в сопредельные районы Северо-Устьюртского массива с образованием пологих срывов в низах осадочного чехла и формированием фронтальных антиклиналей. Тангенциальный стресс и горизонтальные тектонические движения в пограничной зоне периодически возобновлялись и на платформенном этапе развития, что привело к образованию в ее пределах принадлежового Кырынско-Токубайского вала и Каражанбасско-Жаманорпинской антиклинальной зоны, маркирующих в платформенных отложениях местоположение северо-восточной границы Центрально-Мангышлакской системы дислокаций.

Ключевые слова: Центрально-Мангышлакская система дислокаций, Северо-Устьюртский докембрийский массив, тангенциальный стресс, складчато-надвиговые дислокации.

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

Для цитирования: Попков В.И., Попков И.В. Характер сочленения Северо-Устьюртского докембрийского массива и раннекиммерийской Центрально-Мангышлакской системы дислокаций. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 6-17. DOI: 10.46698/VNC.2025.63.47.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.63.47.001

Original paper

The nature of the junction of the North Ustyurt Precambrian massif and the early Cimmerian Central Mangyshlak dislocation system

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

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

Received: 21.01.2025, revised: 20.02.2025, accepted: 21.02.2025

Abstract: Relevance. The Central Mangyshlak dislocation system and the North Ustyurt Precambrian massif play a decisive role in the regional structure of the western Turan Plate. The Permian-Triassic deposits that make up the Central Mangyshlak dislocation system underwent intense deformation at the Triassic-Jurassic boundary, while within Northern Ustyurt they are part of the cover of the ancient massif. Clarification of the structural features of the junction zone of these large structural elements allows us to obtain additional information about the geodynamic setting of the formation of the young platform, and can also help solve some petrogeological problems, since oil and gas accumulations are discovered within them. **Aim.** Disclosure of the structural features of the junction zone of the Central Mangyshlak Early Cimmerian folded system with the Precambrian North Ustyurt massif. **Methods.** To solve this problem, a comprehensive analysis of seismic survey materials, high-precision aeromagnetic survey on a scale of 1:50,000, deep drilling was carried out, and core material was studied. Interpretation of time sections allowed us to obtain information about the morphology of folded dislocations and the kinematics of ruptures. Well sections were correlated. Methods of structural analysis were applied. **Results.** The thrust nature of the junction of the North Ustyurt Precambrian massif and the Central Mangyshlak dislocation system has been established. The horizontal amplitude of thrusting of the Permian-Triassic folded complex onto coeval deposits of Northern Ustyurt is estimated to reach 15-20 km. Tangential stresses were also transmitted to adjacent areas of the North Ustyurt massif with the formation of gentle detachments in the lower sedimentary cover and the formation of frontal anticlines. Tangential stress and horizontal tectonic movements in the boundary zone periodically resumed at the platform stage of development. This led to the formation within its boundaries of the Kyrin-Tokubai swell and the Karazhanbass-Zhamanorpa anticlinal zone, marking the location of the northeastern border of the Central Mangyshlak dislocation system in platform deposits.

Keywords: Central Mangyshlak dislocation system, North Ustyurt Precambrian massif, tangential stress, fold-thrust dislocations.

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

For citation: Popkov V.I., Popkov I.V. The nature of the junction of the North Ustyurt Precambrian massif and the early Cimmerian Central Mangyshlak dislocation system. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 6-17. DOI: 10.46698/VNC.2025.63.47.001

Введение

В глубинной структуре западной части Туранской плиты выделяются Северо-Устьуртский докембрийский массив, а также участки с эпигерцинским возрастом континентальной коры, разделенные раннекиммерийскими складчатыми зонами. Каждый из этих структурных элементов включает в себя структурные единицы подчиненного порядка. Несмотря на многолетнюю историю изучения данного ре-

гиона и накопленный геолого-геофизический материал вплоть до настоящего времени продолжают сосуществовать различные взгляды на принципиальные вопросы его тектонического строения, возраста фундамента и границ основных структур, входящих в его состав [Глумов и др., 2004; Жолтаев и др., 2019; Летавин, 1978; Garzanti, Gaetani, 2002; Lemaire et al., 1998; Natalin, Sengor, 2005]. Достаточно широкое распространение получила точка зрения о рифтогенной природе пермско-триасовых прогибов [Антипов и др., 2024; Жолтаев, Куандыков, 1999; Мурзагалиев, 1996], выполненных мощной толщей преимущественно осадочных отложений, дислоцированных на рубеже триасового и юрского периодов. Однако и здесь нет единства во взглядах о границах раннекиммерийских складчатых зон и их взаимоотношениях как друг с другом, так и с сопредельными геоблоками [Крылов, Гризик, 2015; Летавин, 1978; Попков, 1986; Мурзагалиев, 1996; Thomas et al., 1999a].

Соответственно с этим разнятся и оценки перспектив нефтегазоносности глубокопогруженных комплексов запада Туранской плиты, подходы к выбору основных направлений геологоразведочных работ [Крылов, Гризик, 2015; Куандыков и др., 2004; Летавин, 1978; Нурабаев, 2024].

В предшествующих публикациях [Попков, 1986] нами были обоснованы границы распространения пермско-триасовых складчатых зон: Центрально-Мангышлакско – Карашорской и Туаркыр-Караауданской, выполнено тектоническое районирование доплитного комплекса Мангышлака и Устюрта (рис. 1).

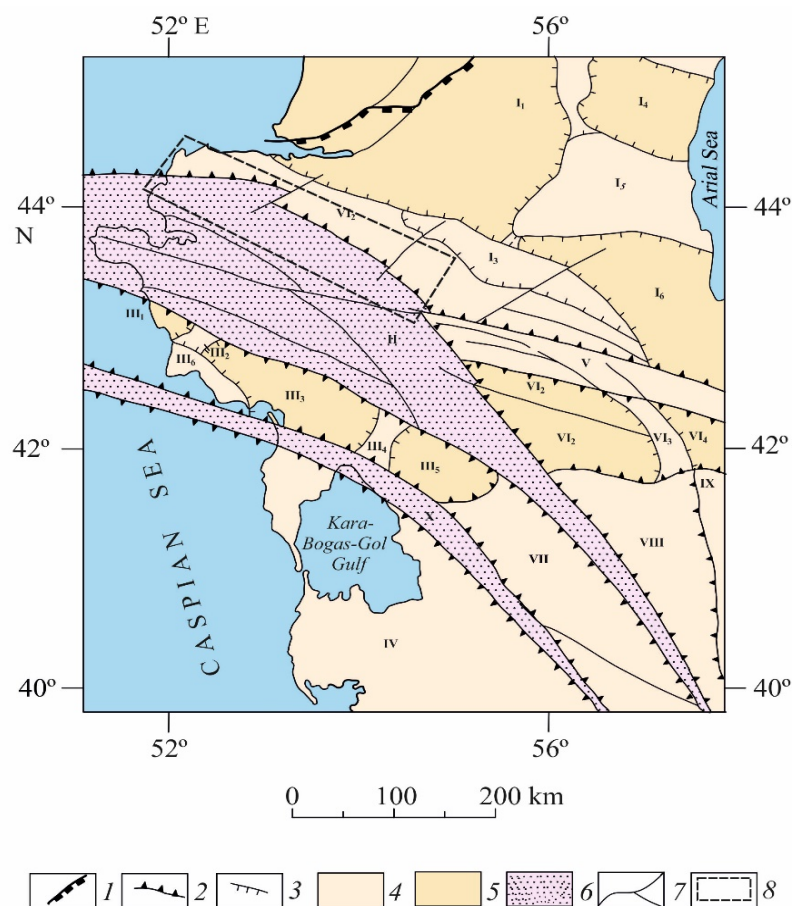


Рис. 1. Обзорная тектоническая схема триасовых отложений запада Туранской плиты. 1 – граница Туранской и Русской плит; границы тектонических элементов: 2 – первого, 3 – второго порядков; 4 – зоны поднятий; 5 – зоны погружения; 6 – раннекиммерийские складчатые системы; 7 – основные разломы; 8 – район исследований.

Цифры на схеме: I – Северо-Устьюртская синеклиза: I₁ – Култукско-Самская депрессия, I₂ – Арстановско-Ирдалинская ступень, I₃ – Астауойская моноклираль, I₄ – Косбулакская депрессия, I₅ – Акумсукский выступ, I₆ – Барсакельмесская депрессия; II – Мангышлакско-Карашорская система дислокаций; III – Южно-Мангышлакская система прогибов: III₁ – Сегендыкская депрессия, III₂ – Карагинская седловина, III₃ – Жазгурлинская депрессия, III₄ – Карынжарыкская седловина, III₅ – Учкудукская депрессия, III₆ – Песчаномысско-Ракушечная зона поднятий; IV – Кара-Богазский массив; V – Центрально-Устьюртская система поднятий; VI – Южно-Устьюртская система прогибов: VI₁ – Шахпахтинская ступень, VI₂ – Ассак-Ауданский прогиб, VI₃ – Сарыкамьшская седловина, VI₄ – Дарьялык-Дауданский прогиб; VII – Кумсебшенский выступ; VIII – Верхнеузбойский прогиб; IX – Центрально-Каракумский массив; X – Туаркыр-Карауданская система дислокаций /

Fig. 1. Overview tectonic scheme of the Triassic deposits of the west of the Turanian plate.

1 – the boundary of the Turanian and Russian plates; the boundaries of tectonic elements:

2 – of the first, 3 – of the second order; 4 – uplift zones; 5 – immersion zones;

6 – Early Cimmerian folded systems; 7 – major faults; 8 – research area.

The figures in the diagram are: I – North Ustyurt syneclise: I₁ – Kultuk-Sam depression, I₂ – Arstanov-Irdal stage, I₃ – Astauoi monocline, I₄ – Kosbulak depression, I₅ – Akumsuk ledge, I₆ – Barsakelmess depression; II – Mangyshlak-Karashor dislocation system; III – South Mangyshlak deflection system:

III₁ – Segendyk depression, III₂ – Karagiinskaya saddle, III₃ – Zhazgurlinsky depression, III₄ – Karynzhar'yk saddle, III₅ – Uchkuduk depression, III₆ – Peschanomyssk-Rakushechnaya uplift zone;

IV – Kara-Bogaz massif; V – Central Ustyurt uplift system; VI – South Ustyurt deflection system:

VI₁ – Shakhpakhtinskaya step, VI₂ – Assake-Audan trough, VI₃ – Sarykamysh saddle, VI₄ – Daryalyk-Daudan trough; VII – Kumsebshen ledge; VIII – Verkhneuzboy trough; IX – Central Karakum massif;

X – Tuarkyr-Karaaudan dislocation system

В данной работе основное внимание уделено особенностям строения зоны сочленения Северо-Устьюртского докембрийского массива с Центрально-Мангышлакским сегментом Центрально-Мангышлакско – Карашорской раннекиммерийской системы дислокаций.

Материалы и методы исследований

Наиболее ценную информацию о структуре осадочного разреза содержат материалы сейсморазведки методом отраженных волн. Исследуемая территория покрыта сейсмическими исследованиями разной детальности – от отдельных региональных профилей до детальных площадных работ масштаба 1:50 000. На локальных поднятиях пробурены поисково-разведочные скважины, многие из которых вскрыли триасовые и пермские отложения на значительную мощность. Совместное использование данных бурения и сейсморазведки дало возможность не только стратифицировать отражающие горизонты, но и выполнить детальные структурные построения по основным опорным горизонтам, в том числе по подошве юрских отложений, а также составить сейсмогеологические разрезы.

Изучение волновой картины сейсмических временных разрезов позволило установить важные детали морфологии и истории развития складчатых дислокаций, а также установить кинематическую природу разрывов: надвигов, сдвигов, пологих тектонических срывов.

Для определения местоположения границы Северо-Устьюртского докембрийского массива и Центрально-Мангышлакской системы дислокаций в фундаменте использованы материалы высокоточной аэромагнитной съемки масштаба 1:50 000. Наблюдения велись с применением современных квантовых магнитометров и радиогеодезической привязкой маршрутов. Высокая детальность итоговых построений позволила достаточно уверенно определить положение тектонической границы разновозрастных блоков земной коры.

Изучен керновый материал, осуществлены расчленение и корреляция разрезов скважин. Привлечены материалы предшествующих исследователей [Липатова и др., 1985]. Формационный анализ триасовых отложений Северного Устья и Кырынско-Токубайского вала с применением методов сейсмостратиграфии позволил установить тектоническое сближение в пограничной зоне разрезов, сформировавшихся в различных литолого-фациальных обстановках.

Результаты исследований и их обсуждение

Крупнейшей надвиговой структурой в пределах Северо-Устьюртской синеклизы является Кырынско-Токубайский разлом, ограничивающий с северо-востока Центрально-Мангышлакскую зону пермско-триасовой складчатости [Попков, 1986]. По сути, он является составным звеном надвиговой системы Бузачинского свода [Попков, Попков, 2023], которая смещена к северу относительно Кырынско-Токубайского надвига по правостороннему сдвигу северо-восточной ориентировки, трассирующемуся к западу от Кызан-Акшимрауской складки (рис. 2).

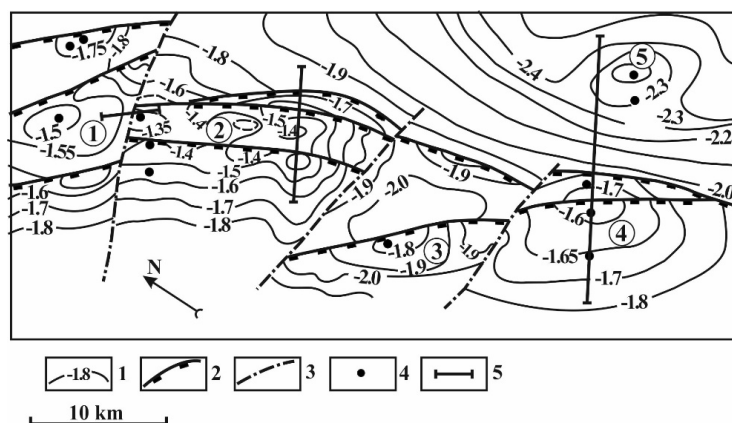


Рис. 2. Кызан-Акшимрауская часть Кырынско-Токубайской надвиговой зоны. Структурная карта по подошве юрских отложений: 1 – стратоизогипсы, км; 2 – надвиги; 3 – сдвиги; 4 – скважины; 5 – положение сейсмических разрезов, приведенных на рис. 3–5. В кружках – антиклинали: 1 – Кызанская; 2 – Акшимрауская; 3 – Западно-Кыринская; 4 – Кыринская; 5 – Тумсыкская /
Fig. 2. Kyzan-Akshimrau part of the Kyrin-Tokubai thrust zone. Structural map of the base of Jurassic deposits: 1 – stratoisohypses, km; 2 – thrusts; 3 – shifts; 4 – wells; 5 – position of seismic sections shown in Fig. 3–5. In circles – anticlines: 1 – Kyzan; 2 – Akshimrauskaya; 3 – West Kyrinskaya; 4 – Kyrinskaya; 5 – Tumsyk

Фронтальная часть надвига контролирует одноименный платформенный вал, простирающийся в северо-западном направлении на расстояние 200 км при ширине 15-20 км, отделяя Южно-Бузачинский линейный прогиб от собственно Северо-Устьюртской системы прогибов. Северо-восточное более крутое крыло вала на всем протяжении оборвано крупным разрывом, амплитуда смещения по которому по подошве юрских отложений измеряется первыми сотнями метров.

В состав Кырынско-Токубайского вала входят Токубайская, Кыринская, Западно-Кыринская и Кызан-Акшимрауская антиклинали. Углы падения слоев пермо-триасового комплекса, вскрытого скважинами на всех перечисленных площадях, колеблются от 40 до 65°. Плотность пород близка плотности пермо-триаса Горного Мангышлака. Следствием этого являются и повышенные пластовые скорости, достигающие 5400 м/с.

Кызан-Акшимрауская складка, располагающаяся в северо-западной части вала, имеет размеры 30×10 км. В ее своде обнажены известняки среднего эоцена, обрамленные на крыльях верхнеэоценовыми и олигоценовыми отложениями. Подошва меловых отложений залегает здесь на глубине около 1200 м, амплитуда поднятия по подошве неокома – 150 м. По подошве юры амплитуда складки возрастает до 400 м.

Ограничивающий ее с северо-востока взброс является фрагментом регионального Кырынско-Токубайского разлома. Амплитуда его на этом участке по подошве юры составляет около 200 м, по подошве мела – 100 м. Свод поднятия осложнен еще одним малоамплитудным взбросом. В доюрском разрезе происходит резкое выполаживание поверхностей надвигов и слияние их в один крупный пологий срыв. То есть на данном участке наблюдается отчетливое чешуйчатое строение Кырынско-Токубайского надвига (рис. 3). В лобовых частях тектонических чешуй доюрские породы смяты в асимметричные принадвиговые складки, в сводах которых триасовые образования в значительной степени размыты в предъюрское время и на эрозионную поверхность выведены отложения нижнего триаса. В тыловой части надвига появляются более молодые толщи триаса, а степень их дислоцированности заметно убывает. Перекрывающие юрские отложения залегают с резко выраженным стратиграфическим и угловым несогласием.

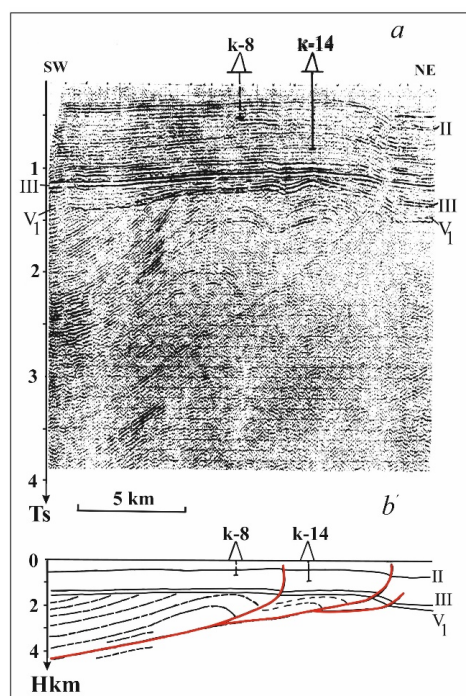


Рис. 3. Разрезы через Акшимраускую антиклиналь:
а – сейсмический,
б – сейсмогеологический. На сейсмогеологическом разрезе соотношение вертикального и горизонтального масштабов 1:1. Отражающие горизонты в подошве:
 V_1 – юры;
III – нижнего мела; II – сенон-турона /

Fig. 3. Sections through the Akshimrau anticline: a – seismic,
b – seismic and geological. On a seismic geological section, the ratio of vertical and horizontal scales is 1:1. Reflecting horizons at the base: V_1 – Jurassic; III – Lower Cretaceous; II – Senonian-Turonian

К юго-востоку от рассмотренной структуры располагаются Западно-Кырынское и Кырынское поднятия, имеющие близкое строение (см. рис. 2). В своде Кыринской антиклинали под отложениями юры вскрывается дислоцированный нижний триас (углы наклона слоев, замеренные в керне, составляют 45-60°), поэтому вполне естественно, что в доюрской части разреза регулярных сейсмических отражений здесь получить не удалось. В скважине 1 отмечено повторение в разрезе отдельных секций нижнего триаса, что может указывать на то, что ею пересечена поверхность еще одного надвига.

К северо-востоку от разлома, на территории уже принадлежащей Северо-Устюртскому докембрийскому массиву, вырастают мощности юрских и меловых отложений. Одновременно появляются в разрезе средний триас и сейсмическая информация о внутренней структуре пермо-триаса, имеющего здесь пологоволнистое залегание. В низах доюрского осадочного комплекса фиксируется пологий срыв,

во фронтальной части которого сформированы чешуйчатый веер и принадвиговая Тумсыкская антиклиналь. То есть здесь можно видеть последствия трансляционной передачи как минимум на 20–25 км в пределы сопредельных районов Северного Устьурта тангенциальных напряжений со стороны надвигающихся с юго-запада складчатых Центрально-Мангышлакских дислокаций (рис. 4).

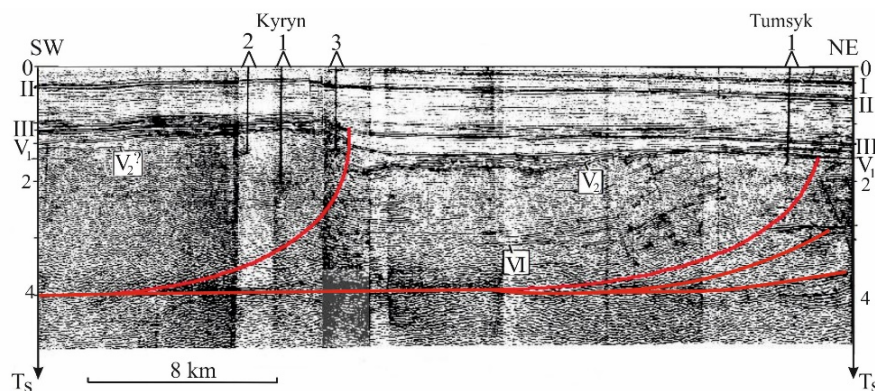


Рис. 4. Сейсмический разрез по линии Кырын (Кырынско-Токубайский вал) – Тумсык (Северо-Устьуртский массив). Отражающие горизонты в подошве: VI – нижнего триаса; V₂ – среднего триаса; V₁ – юры; III – нижнего мела; II – сенон-турона; I – палеогена /

Fig. 4. Seismic section along the line Kyryn (Kyryn-Tokubai swell) – Tumsyk (North Ustyurt massif). Reflecting horizons at the base: VI – Lower Triassic; V₂ – Middle Triassic; V₁ – Jurassic; III – Lower Cretaceous; II – Senonian-Turonian; I – Paleogene

Токубайское поднятие находится в юго-восточной части Кырынско-Токубайского вала. Оно также имеет асимметричное строение: юго-западное крыло – пологое, северо-восточное принадвиговое – крутое и короткое. Дислоцированность доюрских отложений во фронтальной части надвига и, как следствие, отсутствие сейсмических отражений, уменьшенная мощность юры и мела в своде поднятия и возрастание ее сразу же за плоскостью разрыва, появление в разрезе верхних горизонтов триаса и его спокойное залегание к северо-востоку от надвига – все это характерно и для данного участка вала (рис. 5). Кроме того, в этом районе можно также наблюдать надвигание триасовых толщ на юрские отложения с амплитудой горизонтального перекрытия порядка 800 м. Плоскость надвига пересечена скважиной 3 Токубай.

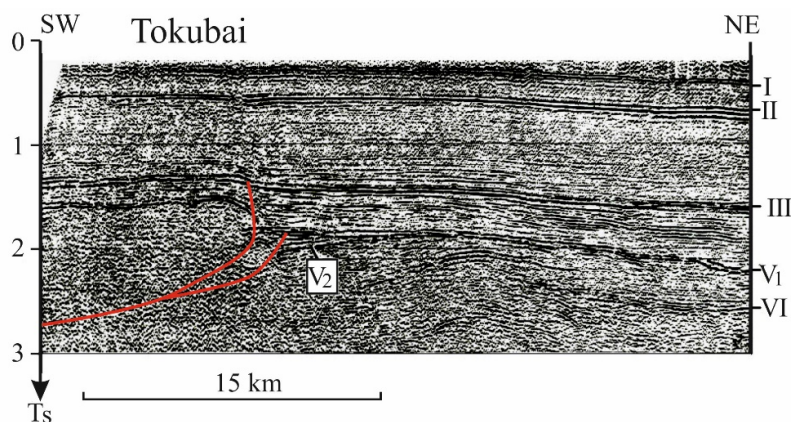


Рис. 5. Сейсмический разрез через Токубайскую антиклиналь. Стратификацию отражающих горизонтов см. на рис. 4 /

Fig. 5. Seismic section through the Tokubai anticline. For the stratification of reflecting horizons, see Fig. 4

Кырынско-Токубайский вал разбит поперечными сдвигами. Некоторые из них являются взбросо-сдвигами, как, например, разрыв, ограничивающий с северо-запада Кызан-Акшимраускую складку (рис. 6). Поверхность разрыва наклонена к юго-востоку под углом около 45° .

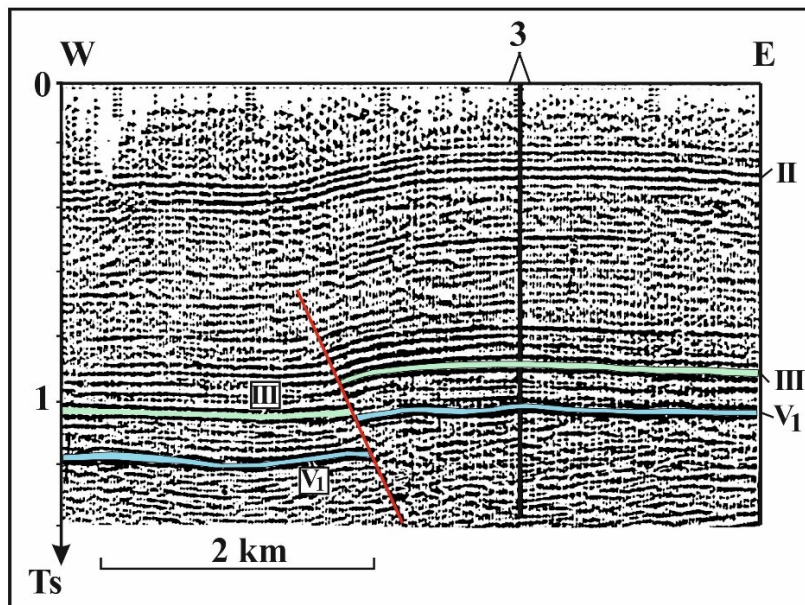


Рис. 6. Взбросо-сдвиг. Стратификацию отражающих горизонтов см. на рис. 4 /

Fig. 6. Reverse-slip fault. For the stratification of reflecting horizons, see Fig. 4

На примере Кырынско-Токубайского надвига можно достаточно точно определить амплитуду надвигания дислоцированных доюрских толщ Мангышлакской системы дислокаций на одновозрастные отложения Северо-Устьюртского массива. Как уже отмечалось, высокоамплитудное разрывное нарушение в платформенном комплексе отмечается лишь вдоль северо-восточного крыла Кырынско-Токубайского вала. В доюрском разрезе происходит резкое выполаживание плоскости разрыва, что хорошо видно на прилагаемых разрезах, при юго-западном падении его поверхности. В то же время, по данным высокоточной крупномасштабной аэромагнитной съемки, субпараллельно линии разрыва, следящегося в платформенном чехле, но со смещением относительно него к юго-западу на 15-20 км, трассируется крупное нарушение в теле фундамента, вдоль которого происходит сочленение докембрийского Северо-Устьюртского массива с областью более молодой коры [Попков, 1986]. На глубине, непосредственно под платформенным разрывом, аналогичного нарушения нет.

Следовательно, имеются все основания говорить о надвигании доюрских осадочных толщ с юго-запада на одновозрастные образования Северо-Устьюртского массива с амплитудой горизонтального перекрытия в 15-20 км. Близкую величину «нависания» доюрских осадочных толщ, слагающих аллохтон Кырынско-Токубайского надвига, над подстилающими отложениями дают и данные сейсморазведки МОГТ.

Указанием на горизонтальную транспортировку пермско-триасовых толщ в рассматриваемом районе может служить и фациальный облик триасовых отложений, вскрытых скважинами в аллохтоне Кырынско-Токубайского надвига. Так, деталь-

ное литологическое изучение доюрского разреза указывает на то, что нижнетриасовые отложения представлены здесь преимущественно сероцветными породами, в которых наряду с терригенными отмечаются карбонатные разности и примесь туфогенного материала [Липатова и др., 1985]. Также отмечается, что этот тип разреза наиболее близок разрезам тююрпинской серии Горного Мангышлака, сформировавшейся в условиях открытого морского водоема с нормальной соленостью.

Одновременно с этим на поднятии Тумсык, располагающемся в 15 км к северо-востоку от Кырынской антиклинали, нижний триас представлен преимущественно терригенными породами пестро- и красноцветной окраски, имеющими в основном континентальный генезис. Характер сейсмической записи на временных разрезах указывает на сохранение этого типа разреза в пределах Северного Устюрта вплоть до Кырынско-Токубайского вала.

Таким образом, фациальные особенности доюрских отложений также указывают на вероятность тектонического сближения Кырынско-Токубайских и располагающихся к северо-востоку разрезов Северного Устюрта, сопровождавшегося передачей тангенциальных напряжений в его пределы с образованием пологих срывов в низах осадочного чехла и формированием фронтальных антиклиналей. Аналогичная ситуация отмечалась нами ранее и для северной части Бузачинского свода, где была сформирована Каламкасская антиклинальная зона, удаленная от зоны сочленения Северо-Устюртского геоблока с раннекиммерийской системой дислокаций на 40 км [Попков, Попков, 2023].

Подвижки по Кырынско-Токубайскому надвигу периодически возобновлялись и в более позднее время, что привело к формированию в его фронтальной части асимметричных антиклиналей в платформенных отложениях, но горизонтальная составляющая амплитуды смещения по нему не превышала, судя по всему, первых сотен метров.

Многие другие локальные поднятия Северного Устюрта, как и рассмотренные ранее, являются приразломными. Статистический анализ взаимосвязи пликативных и дизъюнктивных форм указывает на то, что: 1) поднятия, приуроченные к зонам разломов, обладают гораздо большими амплитудами и площадями, чем поднятия, пространственно не связанные с разломами; только над зонами разломов встречаются антиклинали с аномально высокими (более 100 м) амплитудами; 2) поднятия, приуроченные к зонам разломов, имеют соотношение коротких и длинных осей 1:5-1:3, а поднятия, не связанные с разломами, – 1:1,5.

Примечательно также, что в скважинах, пробуренных в сводах юрско-меловых антиклиналей Северного Устюрта, отмечена повышенная дислоцированность подстилающих отложений триаса: углы падения слоев, замеренные в керне, колеблются от единиц до 60-80°, в то время как в перекрывающих отложениях углы падения не превышают обычно первого десятка градусов. Все это может служить указанием на возможную генетическую взаимосвязь юрско-меловых антиклиналей Северного Устюрта с надвиговыми структурами доюрского осадочного комплекса.

Горизонтальные подвижки по надвигам периодически возобновлялись, но в меньшем масштабе, и на платформенном этапе развития территории. В результате этого в зоне сочленения были сформированы асимметричные принадвиговые поднятия, сгруппированные в протяженные антиклинальные зоны.

Причиной образования тангенциальных напряжений в теле Туранской платформы может быть продолжающееся движение Аравийской плиты в север-северо-

восточном направлении [Попков, 1986; Казьмин и др., 2004; Reilinger et al., 2006; Tibaldi et al., 2020; Tseng et al., 2016; Thomas et al., 1999b].

Выводы

Граница между разновозрастными блоками земной коры – Северо-Устьюртским докембрийским массивом и Центрально-Мангышлакской раннекембрийской складчатой системой имеет надвиговый характер. Амплитуда горизонтального перекрытия пермо-триасовым складчатым комплексом разновозрастных слабдеформированных отложений Северного Устьюрта достигает 15-20 км. Подвижки по надвигам периодически возобновлялись и на платформенном этапе развития территории.

Возникавшие тектонические напряжения в пограничной зоне транслировались в прилегающие районы Северного Устьюрта на расстояние 25-40 км, что сопровождалось формированием в его чехле пологих послонных срывов и фронтальных принадиговых антиклиналей.

Полученные результаты могут способствовать решению практических вопросов нефтяной геологии, поскольку раскрывают механизм формирования определенного типа ловушек нефти и газа. Кроме того, фронтальные части региональных надвигов, где доюрские отложения претерпели интенсивные деформации и уплотнение, могут служить тектоническими экранами, препятствующими латеральной миграции углеводородов из сопредельных осадочных бассейнов.

Литература

1. Антипов М.П., Быкадоров В.А., Волож Ю.А., Патина И.С., Фомина В.В., Барс Ф.М. Триасовые отложения Каспийского региона: состав, строение, условия формирования, нефтегазоносность. // Литология и полезные ископаемые. – 2024. – № 6. – С. 678–699. DOI: 10.31857/S0024497X24060058.
2. Глумов И.Ф., Маловицкий Я.П., Новиков А.А., Сенин Б.В. Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. – 342 с.
3. Жолтаев Г.Ж., Куандыков Б.М. Геодинамическая модель строения юга Евразии. // Нефть и газ. – 1999. – № 2. – С. 62–74.
4. Жолтаев Г.Ж., Исканиев К.О., Битеуова С.А. Региональное строение палеозойских отложений Мангышлака. // Геология, география и глобальная энергия. – 2019. – № 1(72). – С. 7–15.
5. Казьмин В.Г., Лобковский Л.И., Пустовитенко Б.Г. Современная кинематика микроплит в Черноморско-Южно-Каспийском регионе. // Океанология. – 2004. – Т. 44. № 4. – С. 600–610.
6. Крылов Н.А., Гризик А.Я. Новые данные о структуре пермотриасового комплекса Устьюрта, Узбекистан. // Геотектоника. – 2015. – № 4. – С. 54–66.
7. Куандыков Б.М., Турков О.С., Шестоперова Л.В. Геологическое строение и оценка углеводородного потенциала северо-восточного сегмента Каспийского моря (в пределах Казахстана). // Геология регионов Каспийского и Аральского морей. Алматы: КазГео, 2004. – С. 224–236.
8. Летагин А.И. Тафрогенный комплекс молодой платформы юга СССР (тектоника, формации и нефтегазоносность). М.: Наука, 1978. – 148 с.
9. Липатова В.В., Волож Ю.А., Воцалевский З.С., Кривонос В.Н., Николенко В.П. Доюрский комплекс Северного Устьюрта и полуострова Бузачи. М.: Недра, 1985. – 133 с.
10. Мурзагалиев Д.М. Рифтогенез и нефтегазоносность Мангышлака. // Геология нефти и газа. – 1996. – № 5. – С. 36–39.

11. Нурабаев Н. Геологическое строение и нефтегазоносные системы казахстанского сектора Каспийского моря Южно-Мангышлакского осадочного бассейна. // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. – 2024. – Т. 6. № 1. – С. 5–17. DOI: 10.54859/kjogi108707.
12. Попков В.И. Тектоника доюрского осадочного комплекса запада Туранской плиты. // Геотектоника. – 1986. – № 4. – С. 108–116.
13. Попков В.И., Попков И.В. Дислокации бокового сжатия в пермо-триасовом доплитном комплексе и платформенном чехле п-ова Бузачи (запад Туранской плиты). // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 18–31. DOI: 10.46698/VNC.2023.24.56.002.
14. Garzanti E., Gaetani M. Unroofing history of Late Paleozoic magmatic arcs within the “Turan Plate” (Turkmenistan). // Sedimentary Geology. – 2002. – Vol. 151. – pp. 67–87.
15. Lemaire M.M., Westphal M., Montigny R., Gurevitch E.L., Feinberg H., Pozzi J.P., Nazarov K. Paleomagnétisme et évolution du bloc Scythe-Touran du Permien inférieur au Trias supérieur. // Comptes Rendus de l’Académie des Sciences – Series IIA – Earth and Planetary Science. – 1988. – Vol. 327. Issue 7. – pp. 441–448. DOI: 10.1016/s1251-8050(99)80071-8.
16. Natalin B.A., Sengor A.M.C. Late Palaeozoic to Triassic evolution of the Turan and Scythian platforms: The pre-history of the Palaeo-Tethyan. // Tectonophysics. – 2005. – Vol. 404. – pp. 175–202.
17. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R. et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. // Journal of Geophysical Research Atmospheres. – 2006. – Vol. 111. Issue B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051.
18. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T. et al. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. // Journal of Asian Earth Sciences. – 2020. – Vol. 188. – pp. 1–18.
19. Tseng T.-L., Hsu H.-C., Jian P.-R., Huang B.-S., Hu J.-C., Chung S.-L. Focal mechanisms and stress variations in the Caucasus and Northeast Turkey from constraints of regional waveforms. // Tectonophysics. – 2016. – Vol. 691. – pp. 362–374.
20. Thomas J.C., Cobbold P.R., Shein V.S., Le Douaran S. Sedimentary record of late Palaeozoic to Recent tectonism in central Asia—analysis of subsurface data from the Turan and south Kazak domains. // Tectonophysics. – 1999a. – Vol. 313. – pp. 243–263.
21. Thomas J.C., Grasso J.R., Bossu R., Martinod J., Nurtaev B. Recent deformation in the Turan and South Kazakh platforms, western Central Asia, and its relation to Arabia – and India – Asia collisions. // Tectonics. – 1999b. – Vol. 18. – pp. 201–214.

References

1. Antipov M.P., Bykadorov V.A., Volozh Yu.A., Patina I.S., Fomina V.V., Bars F.M. Triassic sediments of the Caspian region: composition, structure, conditions of formation, oil and gas potential. Lithology and minerals. 2024. No. 6. pp. 678–699. DOI: 10.31857/S0024497X24060058. (In Russ.)
2. Glumov I.F., Malovitsky Ya.P., Novikov A.A., Senin B.V. Regional geology and oil and gas potential of the Caspian Sea. Moscow. Nedra–Businesscenter LLC. 2004. 342 p. (In Russ.)
3. Zholtaev G.Zh., Kuandykov B.M. Geodynamic model of the structure of southern Eurasia. Oil and gas. 1999. No. 2. pp. 62–74. (In Russ.)
4. Zholtaev G.Zh., Iskaziev K.O., Biteuova S.A. Regional structure of the Paleozoic deposits of Mangyshlak. Geology, geography and global energy. 2019. No. 1. Issue 72. pp. 7–15. (In Russ.)
5. Kazmin V.G., Lobkovsky L.I., Pustovitenco B.G. Modern kinematics of microplates in the Black Sea-South Caspian region. Oceanology. 2004. Vol. 44. No. 4. pp. 600–610. (In Russ.)
6. Krylov N.A., Grizik A.Ya. New data on the structure of the Permian-Triassic complex of Ustyurt, Uzbekistan. Geotectonics. 2015. No. 4. pp. 54–66. (In Russ.)
7. Kuandykov B.M., Turkov O.S., Shestoperova L.V. Geological structure and assessment of the hydrocarbon potential of the northeastern segment of the Caspian Sea (within Kazakhstan).

Geology of the Caspian and Aral Seas regions. Almaty. KazGeo. 2004. pp. 224–236. (In Russ.)

8. Letavin A.I. Taphrogenic complex of the young platform of the south of the USSR (tectonics, formations and oil and gas potential). Moscow. Nauka, 1978. 148 p. (In Russ.)

9. Lipatova V.V., Volozh Yu.A., Votzalevsky Z.S., Krivonos V.N., Nikolenko V.P. The Pre-Jurassic complex of Northern Ustyurt and the Buzachi Peninsula. Moscow. Nedra. 1985. 133 p. (In Russ.)

10. Murzagaliev D.M. Rifting and oil and gas potential of Mangyshlak. Geology of Oil and Gas. 1996. No. 5. pp. 36–39. (In Russ.)

11. Nurabaev N. Geological structure and oil and gas bearing systems of the Kazakh sector of the Caspian Sea of the South Mangyshlak sedimentary basin. Bulletin of the Oil and gas industry of Kazakhstan. 2024. Vol. 6. No. 1. pp. 5–17. DOI: 10.54859/kjogi108707. (In Russ.)

12. Popkov V.I. Tectonics of the pre-Jurassic sedimentary complex of the western Turanian plate. Geotectonics. 1986. No. 4. pp. 108–116. (In Russ.)

13. Popkov V.I., Popkov I.V. Dislocations of lateral compression in the Permo-Triassic preplate complex and the platform cover of Buzachi Peninsula (west of the Turanian plate). Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 18–31. DOI:10.46698/VNC.2023.24.56.002. (In Russ.)

14. Garzanti E., Gaetani M. Unroofing history of Late Paleozoic magmatic arcs within the “Turan Plate” (Turkmenistan). Sedimentary Geology. 2002. Vol. 151. pp. 67–87.

15. Lemaire M.M., Westphal M., Montigny R., Gurevitch E.L., Feinberg H., Pozzi J.P., Nazarov K. Paleomagnétisme et évolution du bloc Scythie-Touran du Permien inférieur au Trias supérieur. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences – Series IIA – Earth and Planetary Science. 1988. Vol. 327. Issue 7. pp. 441–448. DOI: 10.1016/s1251-8050(99)80071-8.

16. Natalin B.A., Sengor A.M.C. Late Palaeozoic to Triassic evolution of the Turan and Scythian platforms: The pre-history of the Palaeo-Tethyan. Tectonophysics. 2005. Vol. 404. pp. 175–202.

17. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R. et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. Journal of Geophysical Research Atmospheres. 2006. Vol. 111. Issue B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051.

18. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T. et al. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. Journal of Asian Earth Sciences. 2020. Vol. 188. pp. 1–18.

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

20. Thomas J.C., Cobbold P.R., Shein V.S., Le Douaran S. Sedimentary record of late Palaeozoic to Recent tectonism in central Asia—analysis of subsurface data from the Turan and south Kazak domains. Tectonophysics. 1999a. Vol. 313. pp. 243–263.

21. Thomas J.C., Grasso J.R., Bossu R., Martinod J., Nurtaev B. Recent deformation in the Turan and South Kazakh platforms, western Central Asia, and its relation to Arabia – and India –Asia collisions. Tectonics. 1999b. Vol. 18. pp. 201–214.

УДК 553.241:550.83 (571.5)

DOI: 10.46698/VNC.2025.56.76.002

Оригинальная статья

Глубинное строение Станового мегаблока Алдано-Станового щита (по данным опорных профилей 3-ДВ и 8-ДВ)

В.В. Стогний^{ID}, Г.А. Стогний^{ID}

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

Статья поступила: 24.01.2025, доработана: 04.03.2025, принята к публикации: 07.03.2025

Резюме: **Актуальность работы.** Данные опорных геофизических профилей определяют структуру земной коры и применяются для решения ключевых вопросов геотектоники и геодинамики и металлогенического районирования исследуемых регионов. Появившиеся в последние десятилетия материалы опорных геофизических профилей 3-ДВ и 8-ДВ, пройденных в пределах структур Алдано-Станового щита Восточной Сибири, дают новый материал к изучению этого региона. **Цель работы** – определить основные элементы глубинного строения Станового мегаблока и его эволюции. **Методы исследования** – комплексная интерпретация геолого-геофизических материалов данного региона с учетом региональных неоднородностей земной коры в материалах опорных геофизических профилей 3-ДВ и 8-ДВ и типизацией их природы. **Результаты работы.** Обосновано, что основным структурообразующим элементом Станового мегаблока является Каларо-Чогарский межплитный разлом, в зоне которого в результате мезозойской коллизии Северо-Азиатского и Сино-Корейского кратонов была сформирована структура Станового подвижного пояса. Его элементами являются Становой пояс массивов гранитов мезозойского возраста, а также субширотные пояса блоков высокобарических гранулитов, Каларо-Джугджурский и Ларбинско-Чогарский, выдвинутые с нижних горизонтов земной коры, ортогональные простиранию основных структур Алданского мегаблока. Глубинные ограничения Станового мегаблока с юга и севера представлены соответственно Северотурурингским и Чульманским разломами.

Ключевые слова: Становой мегаблок, гравитационное поле, земная кора, Алдано-Становой щит, сейсмические неоднородности, геолого-геофизическая модель, блоки гранулитов, межплитный разлом.

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию Геофизического института ВНЦ РАН, код: FMSM-2025-0025.

Для цитирования: Стогний В.В., Стогний Г.А. Глубинное строение Станового мегаблока Алдано-Станового щита (по данным опорных профилей 3-ДВ и 8-ДВ). *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 18-31. DOI: 10.46698/VNC.2025.56.76.002

DOI: 10.46698/VNC.2025.56.76.002

Original paper

Deep structure of the Stanovoy megablock of the Aldan-Stanovoy shield (according to the data of reference profiles 3-DV and 8-DV)

V.V. Stogny^{ID}, G.A. Stogny^{ID}

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

Received: 24.01.2025, revised: 04.03.2025, accepted: 07.03.2025

Abstract: Relevance. The data of reference geophysical profiles determine the structure of the Earth's crust and are used to solve key issues of geotectonics and geodynamics and metallogenic zoning of the studied regions. The materials of reference geophysical profiles 3-DV and 8-DV, which appeared in recent decades and were passed within the structures of the Aldan-Stanovoy Shield of Eastern Siberia, provide new material for studying this region. **The aim** of the work is to determine the main elements of the deep structure of the Stanovoy geoblock and its evolutions. **Research methods.** Comprehensive interpretation of geological and geophysical materials of the studied region, taking into account regional inhomogeneities of the Earth's crust in the materials of reference geophysical profiles 3-DV and 8-DV and typification of their nature. **Results.** It is substantiated that the main structure-forming element of the Stanovoy megablock is the Kalaro-Chogar interplate fault, in the zone of which the structure of the Stanovoy mobile belt was formed as a result of the Mesozoic collision of the North Asian and Sino-Korean cratons. Its elements are the Stanovoy belt of Mesozoic granite massifs, as well as sublatitudinal belts of high-pressure granulite blocks, the Kalaro-Dzhugdzhursky and Larbinsko-Chogarsky, pushed out from the lower horizons of the Earth's crust, orthogonal to the strike of the Aldan megablock main structures. The deep boundaries of the Stanovoy megablock from the south and north are represented by the Severotukursky and Chulmanskyy faults, respectively.

Keywords: Stanovoy megablock, gravitational field, Earth's crust, Aldan-Stanovoy shield, seismic heterogeneities, geology-geophysical model, granulite blocks, interplate fault.

Acknowledgment: This work was carried out according to the state assignment of the Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, code: FMSM-2025-0025.

For citation: Stogny V.V., Stogny G.A. Deep structure of the Stanovoy megablock of the Aldan-Stanovoy shield (according to the data of reference profiles 3-DV and 8-DV). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 18-31. DOI: 10.46698/VNC.2025.56.76.002

Введение

Алданский щит и Становая (Джугджуро-Становая, Восточно-Становая) складчатая область рассматриваются как единый Алдано-Становой щит [Годзевич, 1986; Стогний и др., 2003]. С позиции блоковой делимости литосферы Алдано-Становой щит в контурах практически совпадает с одноименным геоблоком, состоящим из Алданского и Станового мегаблоков [Красный, 1983]. Становой мегаблок сформировался в зоне взаимодействия Амурской и Восточно-Сибирской литосферных плит, что и определило структуру земной коры и металлогению. В последние десяти-

тилетию появились материалы по глубинному строению данного региона на основе интерпретации материалов опорных геофизических профилей 3–ДВ и 8–ДВ [Гошко и др., 2014; Диденко и др., 2013; Рудницкая и др., 2013; Соловьев и др., 2020, 2021; Хераскова и др., 2018]. Это позволяет с новых позиций подойти к оценке структурных особенностей земной коры Станового мегаблока. В качестве базовых элементов при построении модели строения земной коры принята методика выявления региональных неоднородностей литосферы по комплексному анализу геолого-геофизических материалов и типизации их природы.

Цель проведенных исследований заключалась в рассмотрении и увязке структурных особенностей земной коры Станового мегаблока на основе комплексной интерпретации геолого-геофизических материалов данного региона с учетом региональных неоднородностей земной коры в материалах опорных геофизических профилей 3–ДВ и 8–ДВ и типизации их природы.

Основные элементы структуры Становой складчатой области

За северное ограничение Становой складчатой области принимается Предстановая система субширотных надвигов, трассирующая с юга впадины Южно-Алданской системы, а за южное – Южностановая (см. рис. 1). В составе Предстановой системы хорошо изучены Южно-Якутский, Атугей-Нуямский, Авгенкуро-Майский, Токинский надвиги. Блоки высокобарических гранулитов (Зверевский, Каларский, Верхнетимптонский, Сутамский и Туксанийский) относятся к северной части Станового мегаблока [Стогний и др., 2003].

Становой комплекс. Становой мегаблок сложен раннедокембрийскими метаморфическими породами станового комплекса, представленного тоналит-трондьемито-гнейсами, которые метаморфизованы в высокотемпературной амфиболитовой фации ($T=650\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=6\text{--}8\text{ кбар}$) с повсеместным проявлением процессов ультраметаморфизма.

Селенга-Становой каледонский орогенный пояс (его восточный сегмент по [Тектоника ..., 2005]) на 80% сложен мезозой-палеозойскими гранитоидами, а выходы раннедокембрийских метаморфических пород закартированы в небольших блоках.

Гранулитовые блоки. Гранулитовые блоки Станового мегаблока образуют два субширотных пояса протяженностью до 900 км, Каларо-Джугджурский в составе Каларского, Зверевского, Верхнетимптонского, и Сутамского блоков гранулитов, и Ларбинско-Чогарский пояс в составе Ларбинского, Брянтинского, Сивакано-Токского и Чогарского блоков гранулитов.

Метаморфизм гранулитов изменяется от фации повышенной глубинности до фации высокой глубинности. Так, гранулиты Ларбинского, Сутамского, Брянтинского, Сивакано-Токского и Чогарского блоков метаморфизованы при $T=800\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P=9\text{--}11\text{ кбар}$ [Шульдинер и др., 1983]. Согласно [Балтыбаев и др., 2024] метаморфизм глиноземистых гнейсов Ларбинского блока происходил в условиях гранулитовой фации умеренных давлений (7–8 кбар, 800–850 °C).

Металлогенический облик Становой металлогенической области определяют многочисленные россыпи золота, приуроченные к блокам высокобарических гранулитов. К наиболее крупным золотороссыпным районам следует отнести Дамбукинский, Верхнетимптонский, Сутамский, Предджугджурский и Чогаро-Удыхинский.

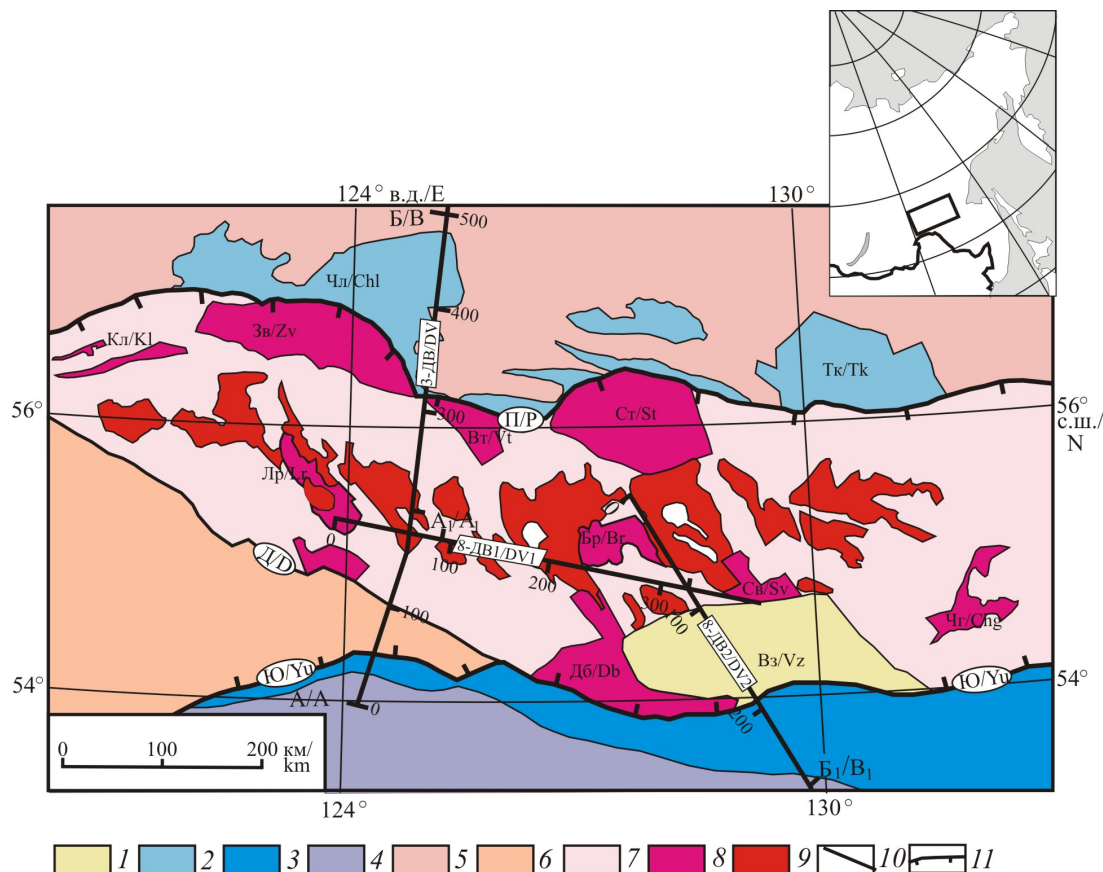


Рис. 1. Схема геологического строения Становой складчатой области по (Геологическая карта Приамурья и сопредельных территорий. Масштаб 1 : 2 500 000 / Гл. ред.: Л.И. Красный, Пэн Юньбяо. С.-П.: ВСЕГЕИ. 1998), [Стогний и др., 2003] (с упрощением) и положение опорных профилей 3-ДВ и 8-ДВ: 1 – четвертичные осадочные отложения Верхнезейской впадины (Вз); 2 – мезозойские осадочные отложения Южно-Алданской системы впадин: Чл – Чульманская, Тк – Токинская; 3 – позднепалеозойско-раннемезозойский Монголо-Охотский орогенный пояс; 4 – позднерифейский Аргунский супертеррейн; 5 – архей-палеопротерозойские метаморфические комплексы Алданского мегаблока; 6 – Селенга-Становой блок; 7–8 – архей-палеопротерозойские метаморфические комплексы Станового мегаблока: 7 – становой комплекс; 8 – высокоградный гранулитовый (блоки гранулитов: Бр – Брянтинский, Вт – Верхнетимптонский, Дб – Дамбукинский, Зв – Зверевский, Кл – Каларский, Лр – Ларбинский, Св – Сиваканотокский, Ст – Сутамский, Чг – Чогарский); 9 – мезозойские граниты Станового пояса; 10 – разломы: Д – Джелтулакский; 11 – границы Становой складчатой области, представленные сериями надвигов: П – Предстановая, Ю – Южностановая. Опорные профили: АБ – 3-ДВ; А₁Б₁ – 8-ДВ (8-ДВ1 и 8-ДВ2 – раскладки соответственно 1 и 2) /

Fig. 1. Scheme of geological structure of Stanovoy folded region according to (Geological map of Amur region and adjacent areas, scale 1 : 2 500 000. Eds. L.I. Krasny, Peng Yungbiao. S.-P. VSEGEI. 1998), [Stogny et al., 2003] (with simplification) and position of reference profiles 3-DV and 8-DV: 1 – Cenozoic sedimentary deposits of the Upper Zeyskaya depression; 2 – Mesozoic sedimentary deposits of the South Aldan system of depressions: Chl – Chulmanskaya, Tk – Tokinskaya; 3 – late Paleozoic-early Mesozoic Mongol-Okhotsk orogenic belt; 4 – late Riphean Argun superterrane; 5 – Archean-Paleoproterozoic metamorphic complexes of the Aldan megablock; 6 – Selenga-Stanovoy block; 7–8 – Archean-Paleoproterozoic metamorphic complexes of the Stanovoy megablock: 7 – Stanovoy complex, 8 – high-grade granulite complex (granulite blocks: Br – Bryantinsky, Vt – Verkhnetimptonsky, Db – Dambukinsky, Zv – Zverevsky, Kl – Kalarsky, Lr – Larbinsky, Sv – Sivakanotoksky, St – Sutamsky, Chg – Chogarsky); 9 – Mesozoic granites of the Stanovoy belt; 10 – faults: D – Dzhehtulaksky; 11 – boundaries of the Stanovoy folded region, represented by a series of thrusts: P – Predstanovaya, Yu – Yuzhnostanovaya. Support profiles: AB – 3-DV; A₁B₁ – 8-DV (8-DV1 and 8-DV2 – layouts 1 and 2, respectively)

Становой пояс мезозойских гранитоидов. Мезозойские граниты и гранодиориты, широко развитые в пределах Станового мегаблока, составляют около 40% его площади. Массивы гранитоидов приурочены к осевым частям Северо-Даурского и Станового хребтов и обычно выделяются соответственно в Амазаро-Гилуиский пояс и Становой пояс гранитоидов.

Плитообразные массивы гранитоидов Станового пояса сформировались на глубине 9–20 км в начальной стадии коллизии Амурской и Восточно-Сибирской литосферных плит за счет частичного плавления на абиссальных уровнях, а затем и за счет полного переплавления вмещающих раннедокембрийских пород на мезо- и гипабиссальных уровнях глубинности, которые являлись для них протолитом, их возраст оценивается в 109–130 млн лет, при этом возраст кремнекислых разностей более древний [Антонов, Банковская, 2000].

Массивы гранитоидов Станового пояса имеют на эрозионном срезе округлую амeboобразную форму без направления преимущественной ориентации, площадь отдельных массивов достигает 2 тыс. км², а контакты их с вмещающими породами станового комплекса обычно постепенные.

Региональные неоднородности земной коры Станового мегаблока в материалах опорных геофизических профилей 3-ДВ и 8-ДВ

Местоположение опорных геофизических профилей 3-ДВ и 8-ДВ показано на схеме геологического строения (рис. 1).

Опорный геофизический профиль 3-ДВ. Профиль 3-ДВ начинается от Сквородино, в районе г. Тында разворачивается в субмеридиональном направлении, и далее по трассе Амуро-Якутской автомагистрали проложен через пос. Малый Нимныр до пос. Томмот Южной Якутии, совпадая с опорным профилем МОВЗ Сквородино-Улу, пройденным в 1970-х гг. [Булин и др., 1972]. В исследуемом интервале (0–500 км, Сквородино-Малый Нимныр) профиль 3-ДВ полностью пересекает Становой мегаблок, в своей южной части ограниченный структурами Монголо-Охотского орогенного пояса, а с севера – структурами Алданского мегаблока (см. рис. 1).

Геофизические исследования опорного профиля 3-ДВ выполнены в 2008–2014 гг. сейсморазведкой методами МОВ-ОГТ, КМПВ, ГСЗ и электроразведкой методом МТЗ. Данные обработки и интерпретации сейсмических материалов, выполненные при различных подходах и используемом программном обеспечении, опубликованы в работах [Гошко и др., 2014; Диденко и др., 2013; Рудницкая и др., 2013]. На рисунке 2 приведен основной материал и геолого-геофизическая модель региональных неоднородностей земной коры изученной нами части профиля 3-ДВ: кривая аномалий силы тяжести в редукции Буге (плотность промежуточного слоя 2,67 г/см³) (рис. 2а); разрез роз-диаграмм элементарных отражающих площадок МОВ-ОГТ земной коры [Диденко и др., 2013] (рис. 2б); геолого-геофизический разрез земной коры по данным комплексной интерпретации (рис. 2в).

В качестве базового для выделения региональных сейсмических неоднородностей в разрезе земной коры южного сегмента опорного геофизического профиля 3-ДВ Сквородино-Малый Нимныр выбран разрез роз-диаграмм элементарных отражающих площадок МОВ-ОГТ из работы [Диденко и др., 2013], полученных при обработке исходных материалов пакетом WinLESSA по методике [Zlatopolsky, 1997] (рис. 2б).

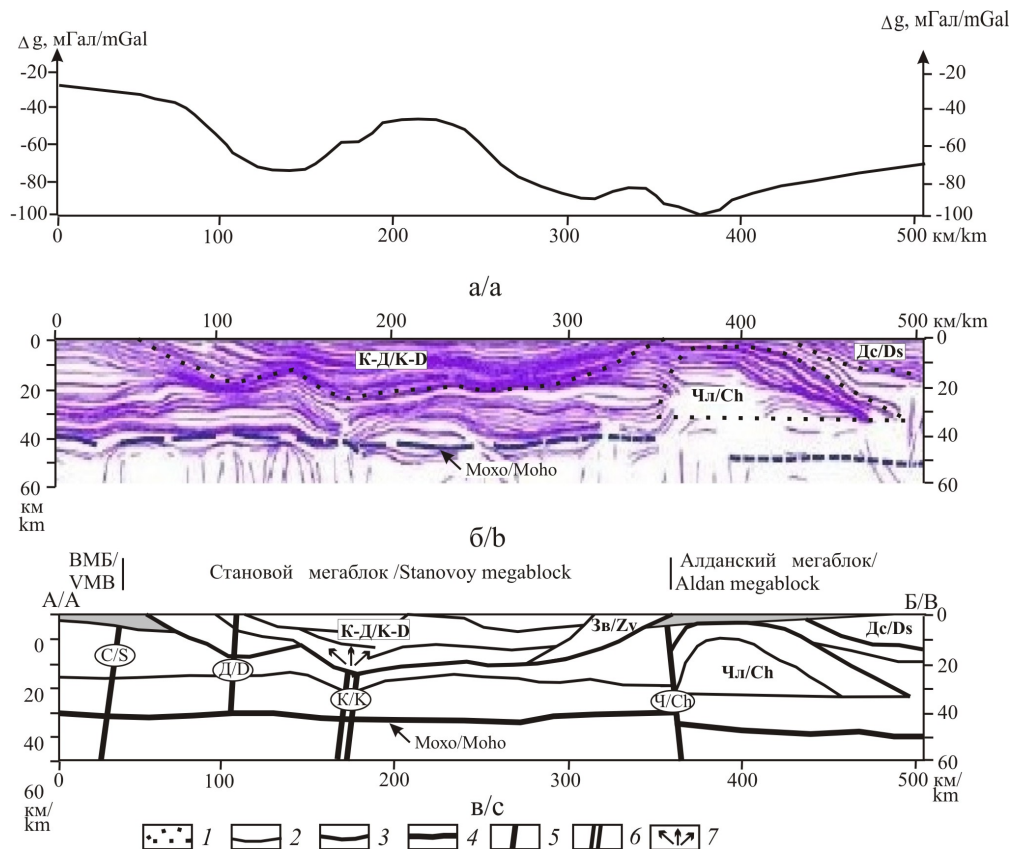


Рис. 2. Геолого-геофизические данные по линии АБ профиля 3-ДВ:

а – кривая силы тяжести Δg в редукции Буге; б – разрез роз-диаграмм элементарных отражающих площадок МОВ-ОГТ и граница Мохоровичича [Диденко и др., 2013] с элементами интерпретации; в – геолого-геофизический разрез земной коры по [Стогний, Стогний, 2021] с добавлениями.

1 – контуры выделенных сейсмических неоднородностей; 2 – границы резких неоднородностей плотности распределения роз-диаграмм элементарных отражающих площадок МОВ-ОГТ; 3 – граница верхней и нижней коры; 4 – граница Мохоровичича; 5 – региональные разломы: С – Северотуруринский, Ч – Чульманский, Д – Джелтулакский; 6 – межплитный Каларо-Чогарский (К) разлом; 7 – направления тектонических движений.

Региональные неоднородности земной коры: К-Д – Каларо-Джугджурская синформа, Зв – Зверевский блок раннедокембрийских гранулитов Станового мегаблока, Чл – мезозойская Чульманская зона разуплотнения, Дс – Деслеглиерская синформа. ВМБ – Верхнеамурский мегаблок /

Fig. 2. Geological and geophysical data along the AB line of the 3-DV profile:

a – gravity curve in the Bouguer reduction; b – section of rose-diagrams of elementary reflecting areas of the reflection-CDP method and the Mohorovicic boundary [Didenko et al., 2013] with elements of interpretation; c – geological and geophysical section of the earth's crust according to [Stogny, Stogny, 2021] with additions. 1 – contours of identified seismic heterogeneities; 2 – boundaries of sharp heterogeneities in the distribution density of rose diagrams of elementary reflecting areas of the reflection-CDP method; 3 – boundary of the upper and lower consolidated crust; 4 – Mohorovicic boundary; 5 – regional faults: S – North Tukuringsky, Ch – Chulmansky, D – Dzheltulaksky; 6 – interplate Kalaro-Chogarsky (K) fault; 7 – directions of tectonic movements.

Regional heterogeneities of the earth's crust: K-D – Kalaro-Dzhugdzhur synform, Zv – Zverevsky block of early Precambrian granulites, Chl – Mesozoic Chulman decompression zone, Ds – Desleglier synform. VMB – Verkhneamursy megablock

В верхней части земной коры в интервале 60–350 км выделена Каларо-Джугджурская региональная сейсмическая неоднородность в виде синформы глубиной до 25 км. Ее характеризует насыщенность слоями роз-диаграмм элементарных от-

ражающих площадок МОВ-ОГТ высокой интенсивности, резко отличающейся от нижней части земной коры (до глубины ~40 км), представленной тонкослоистой волнообразной структурой с разрывом в интервале профиля 150–180 км. Деслегли-ерская синформа Алданского мегаблока (ее южная часть) выделяется в интервале профиля 440–500 км.

Каларо-Джугджурская синформа обладает повышенной расслоенностью, при этом главным структурообразующим при ее образовании, по-видимому, являлся Каларо-Чогарский межплитный разлом мантийного заложения, а Северотукурингский и Чульманский глубинные разломы ограничивают Становой мегаблок соответственно с юга и севера. Северным ограничением Каларо-Джугджурской синформы является Зверевский блок высокобарических гранулитов Станового мегаблока. Чульманская куполообразная структура Алданского мегаблока в своей нижней части очень однородна и практически не содержит роз-диаграмм элементарных отражающих площадок МОВ-ОГТ.

Аномалия силы тяжести Δg профиля 3-ДВ (см. рис. 2а) имеет отчетливо выраженный тренд уменьшения с юга на север, близкий к линейному с градиентом 10 мГал/100 км. В южной части профиля (интервал 70–170 км) выделяется крупная отрицательная аномалия интенсивностью до 30 мГал, обусловленная вероятно масштабной гранитизацией земной коры. Севернее, в интервале 170–250 км, положительной аномалией до 15–20 мГал выделяется Ларбинско-Чогарский пояс гранулитовых блоков. Примерно такой же положительной аномалией интенсивностью до 15–20 мГал выделяется Зверевский блок Каларо-Джугджурского пояса гранулитов в интервале 320–360 км. Расположенная севернее Чульманская куполообразная структура проявляется отрицательной аномалией силы тяжести интенсивностью до 20 мГал в интервале профиля 360–420 км.

Опорный геофизический профиль 8-ДВ. Профиль 8-ДВ (Восточно-Становой фрагмент) был отработан ГСЗ по методике точечных сейсмических зондирований, как и на профиле 3-ДВ [Диденко и др., 2013], двумя расстановками (см. рис. 1): расстановка 8-ДВ1 Ларба-Бомбак протяженностью 390 км и расстановка 8-ДВ2 Верхнезейск-Ульма протяженностью 500 км. Источниками возбуждения упругих колебаний служили взрывы зарядов весом 3–5 т, которые выполнялись в неглубоких водоемах и болотах, расстояние между ними составляло 20–40 км (на расстановке 1 было произведено 13 взрывов, на расстановке 2 – 16). Результаты интерпретации данных ГСЗ Восточно-Станового фрагмента профиля 8-ДВ, выполненные по стандартным методикам [Крылов и др., 1993], содержатся в [Соловьев и др., 2020, 2021].

На рисунке 3 показана кривая аномалий силы тяжести (редукции Буге, плотность промежуточного слоя 2,67 г/см³) (рис. 3а), сводный сейсмический разрез по Восточно-Становому фрагменту профиля 8-ДВ (в интервале 90–550 км) (рис. 3б) и схема распределения плотности структурно-вещественных комплексов (рис. 3в), полученная путем пересчета скорости упругих волн V_p в плотности на основе использования корреляционной зависимости скорость–плотность.

Интервал профиля 90–320 км соответствует расстановке 1 (направление 3-СЗ–В-ЮВ, в интервале 0–90 км отображается только верхняя часть разреза), а интервал профиля 320–550 км соответствует расстановке 2 (направление СЗ–ЮВ).

Скорости продольных упругих волн V_p верхней части земной коры изменяются в пределах 5.5–6.4 км/с, а ее нижней части – 6.4–7.0 км/с (см. рис. 3б). В интервале профиля 360–470 км в верхней приповерхностной части профиля выделяется

область низкоскоростной аномалии, обусловленная осадочными образованиями Верхнезейской впадины, а в интервале 500–530 км – высокоскоростная аномалия ($V_p \geq 7.0$ км/с) на глубине 12–18 км. Верхняя мантия (по [Соловьев и др., 2020]) неоднородна, ее граничные скорости могут изменяться в пределах 7.8–8.5 км/с, наибольшие значения (8.3–8.5 км/с) в интервале 170–280 км профиля, а наименьшие (7.8 ± 0.2 км/с) – в интервале 400–470 км профиля.

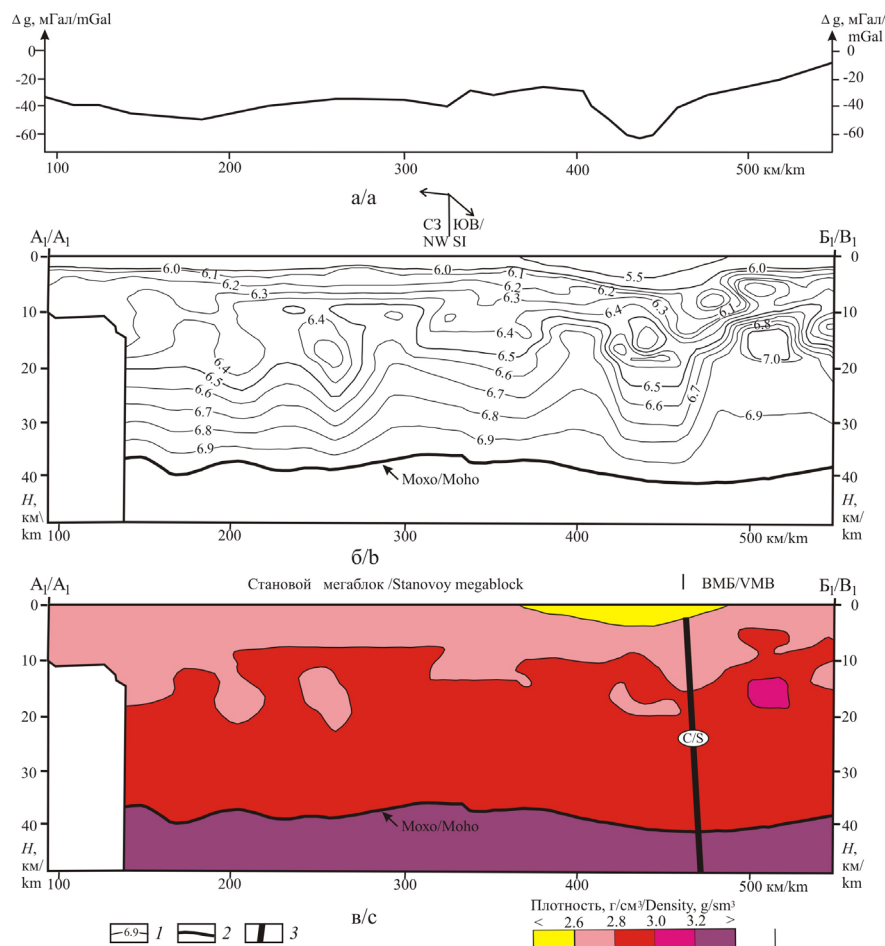


Рис. 3. Геолого-геофизические данные по линии A_1B_1 профиля 8-ДВ:

а – кривая силы тяжести Δg в редукции Буге; б – геолого-геофизический разрез земной коры Станового мегаблока сводного опорного профиля 8-ДВ (Восточно-Становой фрагмент) по [Соловьев и др., 2020], с упрощением; в – плотности структурно-вещественных комплексов. 1 – изолинии скорости продольных волн V_p (цифры – значения V_p в км/с); 2 – граница Мохоровичича; 3 – разломы (С – Северотукурингский). СЗ–ЮВ – направления отрезков (северо-запад–юго-восток) профиля 8-ДВ (расстановки 1 и 2). ВМБ – Верхнеамурский мегаблок /

Fig. 3. Geological and geophysical data along line A_1B_1 of profile 8-DV:

а – gravity curve in the Bouguer reduction; б – geological and geophysical section of the earth's crust of the Stanovoy megablock of the combined reference profile 8-DV (East-Stanovoy fragment) according to [Soloviev et al., 2020] with simplification; в – densities of structural-material complexes. 1 – isolines of longitudinal wave velocity (numbers are values V_p in km/s); 2 – Mohorovicic boundary; 3 – regional fault (N – North Tukuringsky). NW-SE – directions of segments (northwest – southeast) of profile 8-DV (arrangements 1 and 2). VMB – Verkhneamursy megablock

Средние глубины подошвы верхней части консолидированной коры с плотностью $2.6\text{--}2.8$ г/см³ находятся в пределах 8–10 км, при этом отмечаются значительные их неоднородности (до глубин 20–22 км) в нижней части консолидирован-

ной коры (с плотностью 2.8–3.0 г/см³) на интервалах профиля 190–220, 250–280 и 420–460 км (см. рис. 3в). Плотностная неоднородность в интервале 500–530 км профиля (на глубине 12–18 км) обладает плотностью $\rho \geq 3.0$ г/см³, соответствующей плотности высокобарических гранулитов, и соотносится нами с Ларбинским блоком гранулитов средней коры.

Аномалия силы тяжести Δg профиля 8-ДВ (см. рис. 3а) имеет сложный характер, в котором отражаются плотностные неоднородности как земной коры, так и верхней мантии. Наиболее отчетливо проявляется отрицательной гравитационной аномалией (амплитудой до 20 мГал) Верхнезейская впадина на интервале профиля 400–460 км, выполненная осадочными терригенными образованиями.

Результаты и их обсуждение

Совместное рассмотрение и анализ геолого-геофизических материалов региона, главным объектом исследований которого является Становой мегаблок Алдано-Станового щита, и региональных неоднородностей земной коры в материалах обработки опорных геофизических профилей 3-ДВ и 8-ДВ, позволяет детализировать представления о его структуре и механизмах формирования.

Наиболее ярко в верхней части земной коры в материалах обработки данных МОВ-ОГТ по методике [Zlatopolsky, 1997] профиля 3-ДВ [Диденко и др., 2013] (см. рис. 2б) проявляется Каларо-Джугджурская региональная сейсмическая неоднородность в виде синформы глубиной до 25 км, имеющей складчато-надвиговую природу, сформированную в условиях жесткой мезозойской коллизии Амурской и Алданской литосферных плит.

В результате этого процесса в зоне Каларо-Чогарского межплитного разлома был сформирован Ларбинско-Чогарский пояс высокобарических гранулитов, проявляющихся в гравитационном поле положительными аномалиями гравитационного поля интенсивностью до 10–15 мГал, в их числе Нюкжинский, Ларбинский, Гилуйский, Брянтинский, Дамбукинский, Сивакано-Токский и Чогарский, которые являются маркерами местоположения межплитного разлома. Согласно [Балтыбаев и др., 2024], метаморфизм глиноземистых гнейсов Ларбинского блока соответствует условиям гранулитовой фации умеренных давлений (7–8 кбар, 800–850 °С).

Северная граница Станового подвижного пояса трассируется по Каларо-Джугджурскому поясу высокобарических гранулитов, проявляющихся положительными (интенсивностью до 15 мГал) аномалиями силы тяжести, в их числе Каларский, Зверевский, Верхнетимптонский и Сутамский блоки. К югу от Южностановой системы надвигов выделяется Тунгальский линейный максимум гравитационного поля протяженностью более 100 км и амплитудой до 15 мГал, приуроченный к северной части позднерифейского Аргунского супертеррейна.

В юго-восточной части Станового мегаблока Каларо-Чогарский межплитный разлом проходит практически параллельно профилю 8-ДВ1 (раскладка 1) и пересекает его структурно-вещественные комплексы на отрезке сводного профиля 8-ДВ в интервале 340–350 км (раскладка 2). Его влияние отражается в неоднородности верхнего слоя земной коры (до глубины 20–25 км) в виде региональных неоднородностей пониженной плотности, а в южной части профиля выделяется неоднородность, которая по плотностным характеристикам соответствует гранулитовому блоку (Ларбинскому), соответствующему образованиям нижней коры (см. рис. 3в).

Мезозойский возраст формирования структуры Станового подвижного пояса

обосновывается закрытием в конце средней юры восточной части Монголо-Охотского океана в результате аккреции Амурского супертеррейна к южной окраине Северо-Азиатского кратона [Тектоника ..., 2001]. При мезозойской коллизии Северо-Азиатского и Сино-Корейского кратонов в результате тектонического срыва на уровне нижнего слоя земной коры блоки высокобарических гранулитов были выдвинуты в верхние ее части и сформировали Каларо-Джугджурский и Ларбинско-Чогарский субширотные пояса, ориентированные симметрично относительно оси межплитного Каларо-Чогарского разлома. В последующие циклы коллизии срывы на более высоких гипсометрических уровнях привели к выдвиганию гранулитов Амазарского пояса, а также покровов и чешуй станового комплекса. В результате среднеюрской коллизии по северному и южному обрамлению Станового пояса были сформированы Южно-Алданская система впадин на севере, самой крупной из которых является Чульманская, и Удская, Торомская и другие впадины на юге, к которым приурочены угленосные бассейны.

Обзор магматических комплексов юга Сибирского (Северо-Азиатского) кратона выполнен в [Donskaya, Gladkochub, 2021]. Становому поясу гранитоидов на схеме региональной составляющей поля силы тяжести в плане соответствует гравитационная ступень, отождествляемая нами с Каларо-Чогарской сутурой, которая является юго-восточным ограничением Северо-Азиатского кратона. Отдельные массивы мезозойских гранитоидов пояса не находят отражения в гравитационном поле, и частично выделяются в материалах крупномасштабных съемок малоинтенсивными аномалиями амплитудой 2–4 мГал.

В створе опорного профиля 3-ДВ границы Станового мегаблока представлены Северотукурингским литосферным разломом, отделяющим его от Верхнеамурского (Буреинского) мегаблока [Тектоника ..., 2005], а на севере Чульманским литосферным разломом, являющимся южной границей Алданского мегаблока. Джелтулакский коровый разлом, детально изученный [Горошко и др., 2010], с севера ограничивает Селенга-Становую орогенную область. Чульманская региональная сейсмическая неоднородность, соответствующая одноименной купольной структуре южной части Алданского мегаблока, в своей верхней части содержит субпараллельные элементарные отражающие площадки роз-диаграмм МОВ-ОГТ, указывающие на ее расслоенность, а ее нижняя часть (35–52 км) является практически гомогенной. В створе опорного профиля ГСЗ 8-ДВ Северотукурингский литосферный разлом разделяет области с пониженной ($2.6\text{--}2.8\text{ г/см}^3$) плотностью верхней части земной коры с глубиной до 15–20 км в пределах Станового мегаблока и до 10–15 км в пределах Верхнеамурского мегаблока.

Глубина границы Мохоровичича по профилю 3-ДВ в пределах Станового мегаблока изменяется от 40 до 42 км, увеличиваясь в южной части Алданского мегаблока до 45–52 км, при этом в южной части Чульманской купольной структуры эта граница не прослеживается, что соответствует так называемому «окну прозрачности мантии». Такие «окна прозрачности» характерны для докембрийских щитов [Carbonell et al., 2013; Cook et al., 2010], возможные механизмы взаимодействия мантия-кора и формирования кратонов обсуждаются в [Li et al., 2020]. По профилю 8-ДВ глубина границы Мохоровичича изменяется в пределах 37–40 км, увеличиваясь в зоне Северотукурингского литосферного разлома до 42 км.

Сопоставление моделей глубинного строения Центрального Кавказа [Шемпелев и др., 2017; Горбатилов и др., 2023; Стогний, Стогний, 2024] и Станового мега-

блока дает возможность сделать заключение, что наряду с некоторыми общими их особенностями есть и существенные различия, что обусловлено спецификой соответствующих коллизионных процессов и может быть предметом дальнейших исследований.

Выводы

1. В материалах опорного профиля 3-ДВ выделена Каларо-Джугджурская региональная сейсмическая неоднородность в виде синформы глубиной до 25 км с повышенной расслоенностью, отражающая структуру Станового подвижного пояса, южное и северное ограничения которого представлены соответственно Южностановой и Предстановой сериями надвигов.

2. В результате проведенных исследований обосновано, что основным структурообразующим элементом Станового мегаблока является Каларо-Чогарский межплитный разлом, в зоне которого в результате мезозойской коллизии Северо-Азиатского и Сино-Корейского кратонов была сформирована структура Станового подвижного пояса, элементами которой являются Становой пояс массивов гранитов мезозойского возраста, а также субширотные протяженностью до 900 км пояса блоков высокобарических гранулитов, Каларо-Джугджурский и Ларбинско-Чогарский, ортогональные простиранию основных структур Алданского мегаблока.

3. Блоки гранулитов Ларбинско-Чогарского пояса, отражающиеся локальными положительными гравитационными аномалиями, могут служить маркерами местоположения Каларо-Чогарского межплитного разлома Станового мегаблока, ограниченного с юга и севера соответственно Северотукурингским и Чульманским литосферными разломами.

4. Плотностные неоднородности верхней и нижней частей опорного профиля 8-ДВ объясняются влиянием Каларо-Чогарского межплитного разлома, в зоне влияния которого он расположен.

5. Комплексная интерпретация геолого-геофизических материалов региона исследований совместно с данными по опорным геофизическим профилям 3-ДВ и 8-ДВ позволила обосновать модель структуры земной коры Станового мегаблока.

6. Полученные материалы по глубинному строению Станового мегаблока могут быть положены в основу дальнейших исследований стилей коллизионных процессов при анализе их особенностей по сравнению с коллизионной структурой Большого Кавказа.

Литература

1. Антонов А.Ю., Банковская Э.В. Rb-Sr изотопная систематика мезозойских гранитоидов Станового хребта (южное обрамление Алданского щита). // В сборнике: Геохимические процессы и полезные ископаемые. Вестник ГеоИГУ. № 2. Иркутск: ИГТУ, 2000. – С. 163–172.
2. Балтыбаев Ш.К., Доливо-Добровольский Д.В., Юрченко А.В., Волкова Ю.Р., Мальчушкин Е.С. Гранулиты Ларбинского блока Джугджуро-Станового супертеррейна: реконструкция условий образования. // Геология и геофизика. – 2024. – № 9. – С. 1199–1220.
3. Булин Н.К., Афанасьева Н.А., Проняева Е.А., Эрглис Е.И. Глубинный разрез юго-востока Сибирской платформы и её складчатого обрамления по сейсмическим данным. // Советская геология. – 1972. – № 10. – С. 134–142.
4. Годзевич Б.Л. Стратиграфия архея юга Алдано-Станового щита. // В сборнике: Проблемы стратиграфии раннего докембрия Средней Сибири. М.: Наука, 1986. – С. 127–136.

5. Горбатилов А.В., Заалишвили В.Б., Харазова Ю.В., Степанова М.Ю., Милуков 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.

6. Горошко М.В., Каплун В.Б., Малышев Ю.Ф. Джелтулакский разлом: глубинное строение, эволюция, металлогения. // Литосфера. – 2010. – № 6. – С. 38–54.

7. Гошко Е.Ю., Ефимов А.С., Сальников А.С. Современная структура и предполагаемая история формирования земной коры Юго-Востока Северо-Азиатского кратона вдоль опорного профиля 3-ДВ. // Геодинамика и тектонофизика. – 2014. – Т. 5. № 3. – С. 785–798.

8. Диденко А.Н., Ефимов А.С., Нелюбов П.А., Сальников А.С., Старосельцев В.С., Шевченко Б.Ф., Горошко М.В., Гурьянов В.А., Заможняя Н.Г. Структура и эволюция земной коры области сочленения Центрально-Азиатского пояса и Сибирской платформы: профиль Сковородино-Томмот. // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. № 10. – С. 1583–1599.

9. Красный Л.И. О тектонике и минерализации Восточной Сибири и Дальнего Востока. // Тектоника Сибири. Т. XI. Новосибирск: Наука, 1983. – С. 56–64.

10. Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р. и др. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р- и S-волнах. Новосибирск: Наука, 1993. – 199 с.

11. Рудницкая Д.И., Старосельцев В.С., Сальников А.С. Построение макромоделей земной коры с применением Реапак-технологии по геотранверсу 3-ДВ (Восточная Сибирь). // Геофизика. – 2013. – № 1 – С. 19–26.

12. Соловьев В.М., Сальников А.С., Селезнев В.С., Кашубина Т.В., Галева Н.А. Особенности глубинного строения Восточно-Станового фрагмента опорного геолого-геофизического профиля 8-ДВ (по данным ГСЗ). // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2020. – № 4. – С. 29–39.

13. Соловьев В.М., Сальников А.С., Селезнев В.С., Кашубина Т.В., Галева Н.А. Особенности сейсмического строения верхней коры Селенгино-Становой и Амурской складчатых областей по данным разнополяризованных Р- и S-волн (в створе опорного профиля 8-ДВ). // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2021. – № 2. – С. 289–297.

14. 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. 6–22.

15. Стогний В.В., Стогний Г.А. Неоднородности земной коры Алдано-Станового щита по профилю 3-ДВ (Восточная Сибирь, Россия). // Геофизический журнал. – 2021. – Т. 43. № 3. – С. 27–46.

16. Стогний В.В., Стогний Г.А., Зедгенизов А.Н. Становой мегаблок Алдано-Станового щита: структура и эволюция. // Отечественная геология. – 2003. – № 3. – С. 64–66.

17. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). / Отв. редакторы Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. – 571 с.

18. Тектоника, глубинное строение, металлогения области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов. / Отв. редакторы Л.П. Карсаков, Чжао Чуньцин, М.В. Горошко и др. – Владивосток, Хабаровск: ДВО РАН, 2005. – 264 с.

19. Хераскова Т.Н., Яковлев Д.В., Пиманова Н.Н., Березнер О.С. Строение Алданского щита и зоны его сочленения с Центрально-Азиатским складчатым поясом по геофизическим данным интерпретации трансектов «3-ДВ» и «Тында-Амурзет». // Геотектоника. – 2018. – Т. 52. № 1. – С. 3–27.

20. Шемпелев А.Г., Чотчаев Х.О., Кухмазов С.У. Данные глубинных геофизических исследований вдоль Чегемского профиля (Центральный блок, Большой Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 2. – С. 129–134.

21. Шульдинер В.И., Панченко И.В., Шульдинер И.С. Петрология метаморфических комплексов бассейна р. Нюкжи. // *Метаморфизм докембрия района Байкало-Амурской магистралей*. Л.: Наука, 1983. – С. 127–139.
22. Carbonell R., Levander A., Kind R. The Mohorovičić discontinuity beneath the continental crust: An overview of seismic constraints. // *Tectonophysics*. – 2013. – Vol. 609. – pp. 353–376.
23. Cook F.A., White D.J., Jones A.G., Eaton D.W.S., Hall J., Clowes R.M. How the crust meets the mantle: Lithoprobe perspectives on the Mohorovičić discontinuity and crust–mantle transition. // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 2010. – Vol. 47. – pp. 315–351.
24. Donskaya T.V., Gladkochub D.P. Post-collisional magmatism of 1.88–1.84 Ga in the southern Siberian Craton: An overview. // *Precambrian Research*. – 2021. – Vol. 367. – Art. No. 106447.
25. Li D., Hollings P., Chen H., Sun X., Tan C., Zurevinski S. Zircon U–Pb and Lu–Hf systematics of the Western Superior craton, Canada: mantle–crust interaction and mechanism(s) of craton formation. // *Gondwana Research*. – 2020. – Vol. 78. – pp. 231–277.
26. Zlatopolsky A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA. // *Computers and Geosciences*. – 1997. – Vol. 23. – No. 1. – pp. 45–62.

References

1. Antonov A.Yu., Bankovskaya E.V. Rb–Sr isotope systematics of Mesozoic granitoids of the Stanovoy Range (southern framing of the Aldan Shield). In: *Geochemical Processes and Mineral Resources*. Vestnik GeoISU. Irkutsk. ISTU. 2000. pp. 163–172. (In Russ.)
2. Baltybaev Sh.K., Dolivo-Dobrovolsky D.V., Yurshenko A.V., Volkova Yu.R., Malchushkin E.S. Granulite of the Larba block of the Dzhugdzhur-Stanovoi Superterrane: Reconstruction of the Formation Conditions. *Russian Geology and Geophysics*. 2024. No. 9. pp. 1199–1220. (In Russ.)
3. Bulin N.K., Afanasyeva N.A., Pronyaeva E.A., Erglis E.I. Deep section of the southeast of the Siberian platform and its folded frame according to the seismic data. *Sovetskaya geologiya*. 1972. No. 10. pp. 134–142. (In Russ.)
4. Godzevich B.L. Archean stratigraphy of the Aldan-Stanovoy shield. In: *Problems of early Precambrian stratigraphy of Central Siberia*. Moscow. Nauka. 1986. pp. 127–136. (In Russ.)
5. Gorbatiykov 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.)
6. Goroshko M.V., Kaplun V.B., Malyshev Yu.F. The Dzheltulak fault: deep structure evolution and metallogeny. *Lithosphere*. 2010. No. 6. pp. 38–54. (In Russ.)
7. Goshko E.Yu., Efimov A.S., Salnikov A.S. The recent structure and the assumed history of formation of the crust in the south-eastern segment of the North Asian Craton along Reference Profile 3-DV. *Geodynamics and Tectonophysics*. 2014. Vol. 5. No. 3. pp. 785–798. (In Russ.)
8. Didenko A.N., Efimov A.S., Nelyubov P.A., Salnikov A.S., Staroseltsev V.S., Shevchenko B.F., Goroshko M.V., Gur'yanov V.A., Zamozhnyaya N .G. Structure and evolution of the Earth's crust in the region of junction of the Central Asian Fold Belt and the Siberian platform: Skovorodino-Tommot profile. *Russian Geology and Geophysics*. 2013. Vol. 54. No. 10. pp. 1583–1599. (In Russ.)
9. Krasny L.I. On tectonics and minerageny of Eastern Siberia and the Far East. *Tectonics of Siberia*. Vol. XI. Novosibirsk. Nauka. 1983. pp. 56–64. (In Russ.)
10. Krylov S.V., Mishenkin B.P., Mishenkina Z.R. et al. Detailed seismic studies of the lithosphere on P- and S-waves. Novosibirsk. Nauka. 1993. 199 p. (In Russ.)
11. Rudnitskaya D.I., Staroseltsev V.S., Salnikov A.S. Construction of a macromodel of the Earth's crust using Reapak technology based on 3-DV geotraverse (Eastern Siberia). *Geophysics*. 2013. No. 1. pp. 19–26. (In Russ.)

12. Solovyev V.M., Salnikov A.S., Seleznev V.S., Kashubina T.V., Galyova N.A. Depth structure features of the eastern Stanovoy fragment of the 8-DV geological-geophysical survey-base line (according to the DSS data). *Geology and Mineral Resources of Siberia*. 2020. No. 4. pp. 29–39. (In Russ.)
13. Solovyev V.M., Salnikov A.S., Seleznev V.S., Kashubina T.V., Galyova N.A. Features of the seismic structure of the Earth's crust of the Selenga-Stanovoy and Amur folded regions according to data from multipolar P- and S-waves (in the alignment of the 8-DV reference profile). *Geology and Mineral Resources of Siberia*. 2021. No. 2. pp. 289–297. (In Russ.)
14. Stogny V.V., Stogny G.A. Deep structure and rheological stratification of the Greater Caucasus Central segment Earth's crust. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 6–20. (In Russ.)
15. Stogny V.V., Stogny G.A. Inhomogeneities of the Earth's crust of the Aldan-Stanovoy Shield along the 3-DV profile (Eastern Siberia, Russia). *Geophysical journal*. 2021. Vol. 43. No. 3. pp. 27–46. (In Russ.)
16. Stogny V.V., Stogny G.A., Zedgenizov A.N. Stanovoy megablock of the Aldan-Stanovoy shield: structure and evolution. *Otechestvennaya Geologiya*. 2003. No. 3. pp. 64–66. (In Russ.)
17. Tectonics, Geodynamics, and Metallogeny of the Republic Sakha (Yakutia). Eds. L.M. Parfenov, M.I. Kuzmin. Moscow. MAIK "Nauka/Interperiodika". 2001. 571 p. (In Russ.)
18. Tectonics, deep structure, metallogeny of the Central Asian – Pacific belts junction area. Eds. L.P. Karsakov, Zhao Chunjin, M.V. Goroshko et al. Vladivostok. Khabarovsk. FEB RAS. 2005. 264 p. (In Russ.)
19. Kheraskova T.N., Yakovlev D.V., Pimanova N.N., Berezner O.S. Conjugation with the Central Asian foldbelt: interpretation of the 3DV and Tynda–Amurzet transeks. *Geotectonics*. 2018. Vol. 52. No. 1. pp. 3–27. (In Russ.)
20. Shempelev A.G., Chotchaev H.O., Khuhmazov S.U. Data of deep geophysical surveys along Chegem profile (Central block, Greater Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2017. No. 2. pp. 129–134. (In Russ.)
21. Shuldiner V.I., Panchenko I.V., Shuldiner I.S. Petrology of metamorphic complexes of the Nyukzha River basin. Precambrian metamorphism of the Baikal-Amur Mainline area. Leningrad. Nauka. 1983. pp. 127–139. (In Russ.)
22. Carbonell R., Levander A., Kind R. The Mohorovičić discontinuity beneath the continental crust: An overview of seismic constraints. *Tectonophysics*. 2013. Vol. 609. pp. 353–376.
23. Cook F.A., White D.J., Jones A.G., Eaton D.W.S., Hall J., Clowes R.M. How the crust meets the mantle: Lithoprobe perspectives on the Mohorovičić discontinuity and crust–mantle transition. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 2010. Vol. 47. pp. 315–351.
24. Donskaya T.V., Gladkochub D.P. Post-collisional magmatism of 1.88–1.84 Ga in the southern Siberian Craton: An overview. *Precambrian Research*. 2021. Vol. 367. Art. No. 106447.
25. Li D., Hollings P., Chen H., Sun X., Tan C., Zurevinski S. Zircon U–Pb and Lu–Hf systematics of the Western Superior craton, Canada: mantle–crust interaction and mechanism(s) of craton formation. *Gondwana Research*. 2020. Vol. 78. pp. 231–277.
26. Zlatopolsky A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA. *Computers and Geosciences*. 1997. Vol. 23. No. 1. pp. 45–62.

УДК (550.8:551.2.08)::546.296

DOI: 10.46698/VNC.2025.53.30.003

Оригинальная статья

Особенности проведения радонового мониторинга в режиме принудительной доставки почвенного воздуха к детектору в регионах с различными геодинамическими условиями

А.К. Юрков¹, В.Б. Заалишвили², И.А. Козлова¹, С.В. Бирюлин¹,
Д.А. Мельков², Ю.В. Бутанаев³, К.М. Рычкова³, С.А. Имашев⁴,
Е.А. Лазарева⁴, П.А. Каменев⁵

¹ Институт геофизики УрО РАН, Россия, 620016, г. Екатеринбург,
ул. Амундсена, 100, e-mail: akurkov@mail.ru;

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

³ Тувинский Институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Россия,
667007, г. Кызыл, ул. Интернациональная, 117а, e-mail: jyra3@mail.ru;

⁴ Научная станция РАН в г. Бишкеке, Кыргызстан, 720049, г. Бишкек-49,
e-mail: sanzhar.imashev@gmail.com;

⁵ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Россия, 693022,
г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1, e-mail: p.kamenev@imgg.ru

Статья поступила: 27.01.2025, доработана: 12.03.2025, принята к публикации: 14.03.2025

Резюме: Актуальность работы. Установление связи геодинамических процессов с данными геолого-геофизического мониторинга остается актуальной задачей. К наиболее известным и хорошо исследованным относятся явления, связанные с изменением напряженно-деформированного состояния горных пород, которое влияет на состояние подземной гидросферы и атмосферы. Несмотря на большой объем радоновых исследований, до сих пор не выявлены надежные закономерности поведения объемной активности радона, связанные с процессом подготовки сейсмического события. **Цель исследования.** Целью работы является изучение особенностей изменения радонового поля (вариаций объемной активности почвенного радона) при подготовке тектонического землетрясения в сейсмически активных регионах с отличающейся геолого-тектонической обстановкой. **Методы работы.** Мониторинг радона проводился в режиме принудительной доставки почвенного радона к детектору. Интерпретация проводилась по методике, разработанной по результатам, полученным для условий зоны субдукции. **Результаты работ.** Выполнен анализ вариаций объемной активности радона (ОАР) при подготовке землетрясений, полученных при мониторинговых наблюдениях в регионах России отличающихся различной геодинамической активностью. Подтверждена причинно-следственная связь вариаций ОАР с процессом подготовки землетрясений. Установлено, что получаемые закономерности проявления в кривых объемной активности радона процесса подготовки землетрясений не противоречат ранее полученным. Изучены и обобщены ошибки при организации наблюдений с использованием режима принудительной доставки радона к детектору. Показано, что для получения достоверных результатов, позволяющих сравнивать получаемые закономерности поведения ОАР, необходимо учитывать геологические условия установки станций и соблюдать методику измерений в режиме принудительной доставки почвенного радона к детектору.

Ключевые слова: землетрясение, радон, вариации, мониторинг, принудительная доставка, прогноз.

Для цитирования: Юрков А.К., Заалишвили В.Б., Козлова И.А., Бирюлин С.В., Мельков Д.А., Бутанаев Ю.В., Рычкова К.М., Имашев С.А., Лазарева Е.А., Каменев П.А. Особенности проведения радонового мониторинга в режиме принудительной доставки почвенного воздуха к детектору в регионах с различными геодинамическими условиями. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 32-44. DOI: 10.46698/VNC.2025.53.30.003

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

DOI: 10.46698/VNC.2025.53.30.003

Original paper

Features of radon monitoring in the mode of forced delivery of soil air to the detector in the regions with different geodynamic conditions

A.K. Yurkov¹, V.B. Zaalishvili², I.A. Kozlova¹, S.V. Biryulin¹,
D.A. Melkov², Yu.V. Butanaev³, K.M. Rychkova³, S.A. Imashev⁴,
E.A. Lazareva⁴, P.A. Kamenev⁵

¹ Institute of Geophysics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
100 Amundsena Str., Ekaterinburg 620016, Russian Federation,
e-mail: akyurkov@mail.ru;

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

³ Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources, Siberian Branch,
Russian Academy of Science, 117a Internationalnaya Str., Kyzyl 667007,
Russian Federation, e-mail: jyra3@mail.ru;

⁴ Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek,
Bishkek-49 720049, Kyrgyzstan, e-mail: sanzhar.imashev@gmail.com;

⁵ Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch,
Russian Academy of Science, 1 Nauki Str., Yuzno-Sakhalinsk 693022,
Russian Federation, e-mail: p.kamenev@imgg.ru

Received: 27.01.2025, revised: 12.03.2025, accepted: 14.03.2025

Abstract: Relevance. Establishing the connection between geodynamic processes and geological and geophysical monitoring data remains an urgent task. The most well-known and well studied are the phenomena associated with changes in the stress-strain state of rocks, which affects the state of the underground hydrosphere and atmosphere. Despite the large volume of radon studies, no reliable regularities of behavior of radon volumetric activity related to the process of seismic event preparation have been revealed so far. Purpose of the study. **The aim** of the work is to study the peculiarities of the radon field changes (variations of soil radon volumetric activity) during the preparation of a tectonic earthquake in seismically active regions with different geological and tectonic conditions. **Methods.** Radon monitoring was carried out in the mode of forced delivery of soil radon to the detector. The interpretation was carried out according to the methodology developed based on the results obtained for the conditions of the subduction zone. **Results.** The analysis of variations in the volumetric radon activity (VRA) in the preparation of earthquakes obtained during monitoring observations in regions of Russia with different geodynamic activity has been performed. The cause-and-effect relationship of the variations of the VRA with the earthquake preparation process has been confirmed. It is established that the obtained patterns of manifestation in the curves of the volumetric radon activity of the earthquake preparation process do not contradict the previously obtained ones. Errors in the organization of observations using the mode of forced delivery

of radon to the detector have been studied and generalized. It is shown that in order to obtain reliable results that make it possible to compare the obtained patterns of VRA behavior, it is necessary to take into account the geological conditions of station installation and follow the measurement procedure in the mode of forced delivery of soil radon to the detector.

Keywords: earthquake, radon, variations, monitoring, forced delivery, forecast.

For citation: Yurkov A.K., Zaalishvili V.B., Kozlova I.A., Biryulin S.V., Melkov D.A., Butanaev Yu.V., Rychkova K.M., Imashev S.A., Lazareva E.A., Kamenev P.A. Features of radon monitoring in the mode of forced delivery of soil air to the detector in the regions with different geodynamic conditions. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 32-44. DOI: 10.46698/VNC.2025.53.30.003

Введение

Практически каждый день по всему земному шару происходят землетрясения, которые остаются одними из самых опасных и до конца не изученных природных явлений. В настоящее время более 30 % территории России относится к сейсмоопасным зонам. В этих районах расположены крупные мегаполисы, объекты атомной промышленности и энергетики, поэтому уменьшение опасности для жизни людей и снижение экономических потерь от катастрофических явлений остается актуальной задачей. Очевидно, что определение точного времени, места и магнитуды события задача чрезвычайно сложная, но даже определение составляющих прогноза землетрясения может уменьшить человеческие потери и экономический ущерб от воздействия природных катастроф. Несмотря на достаточно многочисленные исследования, связанные с изучением предвестников землетрясений – прогноз остается нерешенной задачей. Тем не менее, развитие сейсмологических наблюдений, проведение лабораторных экспериментов и теоретических исследований, накопление большого статистического материала при натурных исследованиях позволяет полнее понять процесс подготовки землетрясения и на этой основе разрабатывать новые методы его прогноза.

Предвестниками обычно выступают особенности поведения различных физических полей, не всегда одинаково реагирующих на процесс подготовки землетрясения. Поэтому для успешного прогноза необходимо использовать несколько предвестников, подтвердивших свою эффективность на большом статистическом материале [Завьялов, 2006]. Радон, как индикатор изменений напряженного состояния горных пород, приводящих к тектоническим землетрясениям, широко применяется во всем мире [Уткин, Юрков, 1998; Фирстов, Макаров, 2018; Hatuda, 1953; Kasahara, 1979; King et al., 1996; Teng, 1980]. Возникновение аномальных временных изменений концентраций радона изучалось рядом авторов, специализирующихся на измерениях Rn в почвенном газе [Kuo et al., 2010; Mogro-Campero et al., 1980; Planinic et al., 2001; Ramola et al., 1990; Reddy, Nagabhushanam, 2011], в грунтовых водах [Favara et al., 2001; Gregoric et al., 2008; Singh et al., 1999], в приземной атмосфере [Oh, Kim, 2015; Omori et al., 2007].

Получение статистически значимого материала, в первую очередь, связано с количеством происходящих землетрясений. Причем одинаково плохо как малое их количество, так и большое. В последнем случае трудно выделить закономерности подготовки конкретного события. Уникальным объектом для исследований стали Южные Курилы, где частота происходящих землетрясений позволяла проследить подготовку отдельных событий. При поддержке сотрудников Института морской геологии и геофизики ДВО РАН удалось организовать мониторинговые наблюдения объемной активности радона на нескольких Южно-Курильских островах.

В период с 2011 по 2023 гг. сотрудниками Института геофизики УрО РАН получены результаты непрерывного радонового мониторинга на островах Кунашир, Итуруп, Шикотан. На основании этих наблюдений была разработана методика интерпретации и установлены статистически обоснованные закономерности поведения ОАР при подготовке землетрясений применительно к зоне субдукции [Бирюлин, 2022]. Для решения вопроса о применимости полученных закономерностей для других регионов, в последние годы была расширена сеть радонового мониторинга с охватом Урала, Северного Кавказа, Сахалина, Саян, Северного Тянь-Шаня, Крыма. Понятно, что для получения конкретных количественных значений для каждого региона необходимо проведение длительного мониторинга ОАР при достаточном количестве происходящих землетрясений. Кроме этого, условием объективного сравнения получаемых закономерностей поведения ОАР при подготовке землетрясений в регионах, различающихся геодинамической активностью, является соблюдение методики проведения измерений в режиме принудительной доставки радона к детектору и оптимальный выбор геолого-тектонических условий для размещения станций наблюдения. Выбор информативных точек наблюдения очень важен, так как вариации ОАР определяются способностью среды к деформациям в точке наблюдения. В данной статье проведем анализ соответствия характеристик работающих станций радонового мониторинга этим требованиям и покажем особенности отражения подготовки землетрясений в поле радона.

Объекты и методика исследований

Объектом исследований являются вариации объемной активности почвенного радона, полученные в результате проведения радонового мониторинга в различных регионах с отличающейся геодинамической активностью. Методика исследований заключается в проведении анализа отражения сейсмических событий в аномалиях радона, полученных при непрерывных измерениях, выполненных в режиме принудительной доставки почвенного (породного) радона к детектору. Режим принудительной доставки радона из почвы осуществляется с помощью насоса из зонда, установленного на глубину не менее 0.7 м. Данная глубина является наименее градиентной, учитывая вертикальное распределение радона, и на ней существенно снижено влияние на вариации ОАР суточных перепадов температуры и атмосферного давления [Козлова, Юрков, 2005]. Тонкий зонд, перфорированный на конце, не искажает трещинно-поровое пространство и практически не влияет на напряженно-деформированное состояние среды. Применение способа вынужденной доставки радона к детектору существенно увеличивает эффективный объем горных пород, что приводит к «осреднению» их петрофизических характеристик. Как показали исследования по сравнению диффузионного режима измерений и режима вынужденной доставки, регистрируемые аномалии ОАР в последнем случае имеют более высокую амплитуду, небольшую продолжительность (несколько суток), что является важным при краткосрочном прогнозе землетрясений. Для мониторинговых измерений используется недорогая и серийно-выпускаемая аппаратура: регистраторы радона – SIRAD, Radex-107, Radex-107+, насос Sonic-108.

При интерпретации полученных результатов анализировались сейсмические события, происходящие в области установки станции наблюдения. Оценка радиуса проявления радонового предвестника землетрясения основана на соотношении магнитуды к логарифму расстояния от эпицентра события до станции наблюдения

(геодинамический критерий). По разработанной методике отражение в поле радона подготовки землетрясения возможно и при соотношении $M/\lg R \geq 2$ [Бирюлин, 2022]. Данная методика позволяет оценить временной интервал проявления землетрясения в поле радона и отнести событие к «дальней» или «ближней» зоне.

Результаты исследований и их обсуждение

Станция Южно-Курильск (о. Кунашир)

Расположена в зоне субдукции, зонд установлен в подвале сейсмостанции п. г. т. Южно-Курильск на глубине 0.7 м в коре выветривания пород андезито-базальтового состава, слагающих монолитный лавовый поток. Условия проведения измерений на этой станции полностью соответствуют режиму принудительной доставки радона к детектору. Выделяемые аномалии объемной активности радона (ОАР) контрастные, с хорошим превышением над фоном. При интерпретации результатов учитывались события с магнитудой более 4 и радиусом не более 500 км, для выполнения геодинамического критерия $M/\lg R \geq 2$ [Бирюлин, 2022]. За период с 2011 по 2023 гг. было проанализировано 289 событий, удовлетворяющих геодинамическому критерию, и установлено, что 267 предшествовали аномалии ОАР (что составляет 96%). На рисунке 1 представлен пример отражения землетрясений «ближней» (меньше 130 км) зоны.

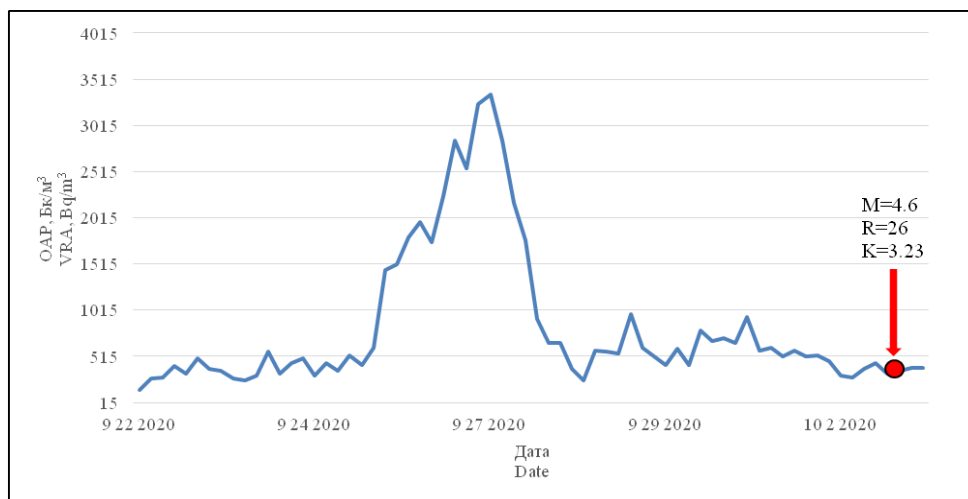


Рис. 1. Фрагмент записи ОАР на Станции Южно-Курильск /
Fig. 1. A fragment of the recording of the VRA at the Yuzhno-Kurilsk Station

Станция Коуровка (Средний Урал)

Средний Урал не относится к сейсмоактивным районам. Редкие ощутимые землетрясения произошли в 1914 г. – Билимбаевское, с магнитудой около 5.5, в 2015 г. – Среднеуральское с магнитудой 4.7, в 2018 г. – Катав-Ивановское с магнитудой 5.6.

Станция наблюдений «Коуровка» расположена на массиве монолитных известняков девонского возраста. Зонд установлен на глубине 0.7 м в подвальном помещении наблюдательного павильона. Наблюдения проводятся в режиме принудительной доставки радона к детектору. Так как события происходят редко, то их достаточно легко выделять и соотносить с аномалиями ОАР. Пример поведения ОАР перед землетрясениями приведен на рисунке 2. После прохождения аномалии через 5–6 дней произошли землетрясения, которые являются «дальними» (расстояние от

пункта наблюдений более 300 км), что соответствует ранее выявленным закономерностям. Особенностью проявления землетрясений в кривых ОАР стал геодинамический критерий $M/\lg R \geq 1.6$, т.е. меньше 2.0. Это может свидетельствовать о том, что для условий Среднего Урала геодинамический критерий, при котором землетрясения отражаются в кривых ОАР, может быть меньше.

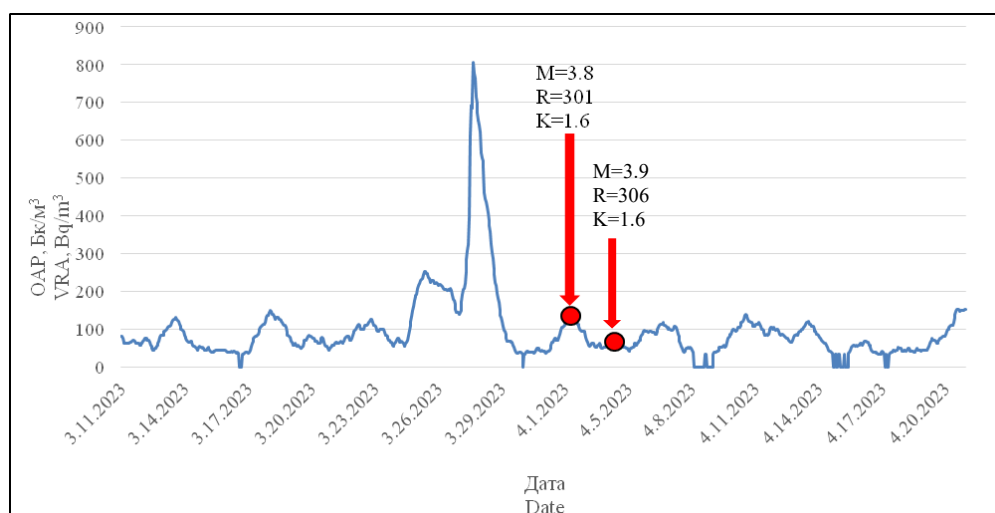


Рис. 2. Фрагмент записи ОАР на станции Коуровка [Юрков и др., 2023в] /
Fig. 2. Fragment of the recording of the VRA at the Kourovka station [Yurkov et al., 2023c]

Еще одна уральская станция наблюдений была установлена в г. Катав-Ивановск после землетрясения в 2018 г. Станция «Катав-Ивановск» расположена на вершине антиклинальной складки в коре выветривания известняков. Режим измерений соответствует принудительной доставке радона, но зонд расположен в подвале административного здания в центре города. Большое количество техногенных помех вносит отрицательный вклад в измерения почвенного радона. С октября 2018 г. по настоящее время в радиусе 200 км не произошло землетрясений с магнитудой больше 2, удовлетворяющих геодинамическому критерию больше 1,6. На рисунке 3 приведен пример записи ОАР, аномалии 16.02.24 г., 18.02.24 г. вызваны техническими помехами. Станция оказалась малоинформативна, в связи с отсутствием происходящих землетрясений.

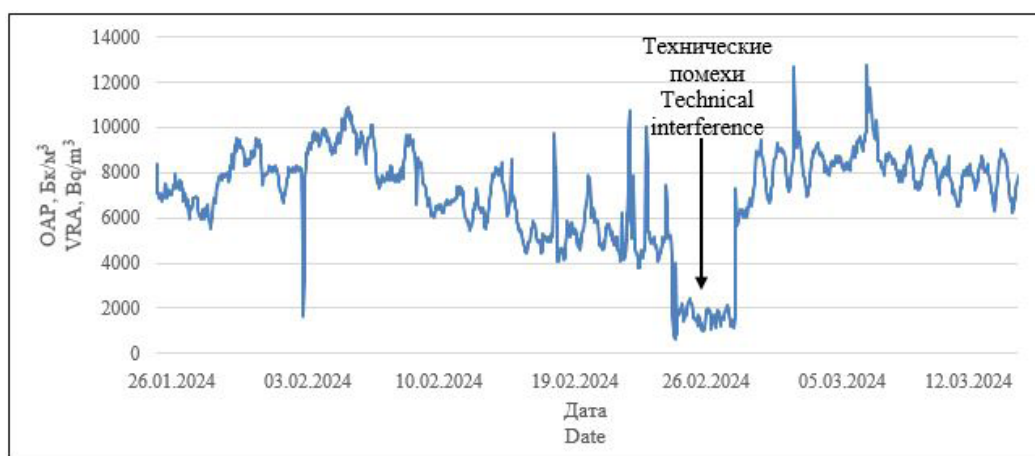


Рис. 3. Фрагмент записи ОАР на станции Катав-Ивановск /
Fig. 3. A fragment of the recording of the VRA at the Katav-Ivanovsk station

Станция «Кармадон» (Северный Кавказ)

Станция расположена в районе развития вулканогенных отложений на склоне вулкана Казбек. Зонд помещен в кору выветривания в павильоне сейсмостанции на глубину 0.7 м. Условия измерений на станции соответствуют методике измерений в режиме принудительной доставки радона к детектору. Пример отражения землетрясения в поле радона приведен на рисунке 4. Аномалия объемной активности радона (ОАР) достаточно контрастная, с хорошим превышением над фоном, что позволяет легко ее выделить. Землетрясение произошло через 10 дней после появления аномалии и выхода ее на фоновый уровень (26.10.18), что соответствует проявлению «близкого» события. К сожалению, на этой станции за период наблюдений дальние события не проявились в вариациях ОАР. Возможная причина – экранирующее влияние системы хребтов Кавказского орогена и геодинамический критерий событий был меньше 2.0.

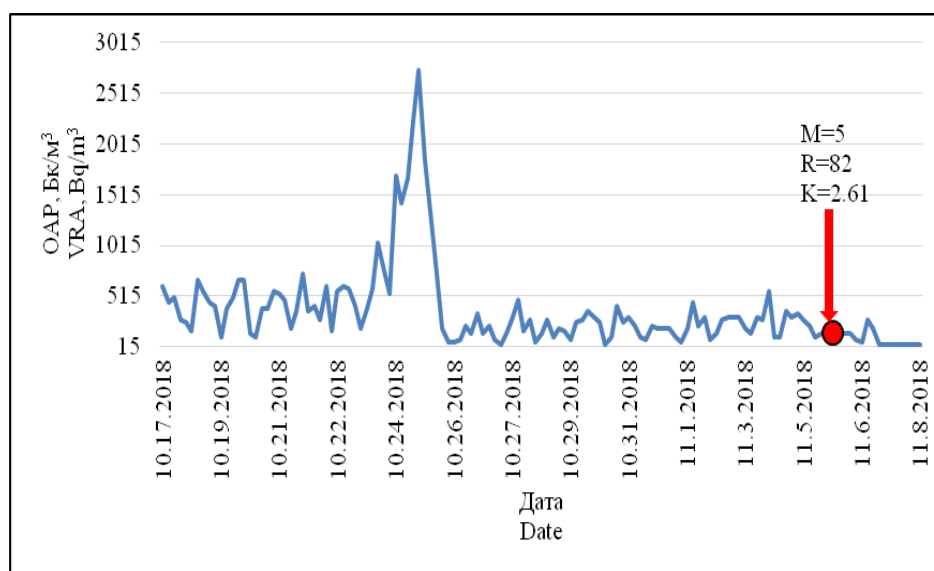


Рис. 4. Фрагмент записи ОАР на станции Кармадон, Северный Кавказ
[Заалишвили и др., 2022]/

Fig. 4. Fragment of the recording of the VRA at Karmadon station, North Caucasus
[Zaalishvili et al., 2022]

Станция Владикавказ (г. Владикавказ)

Расположена в цокольном этаже Геофизического Института ВНЦ РАН. Зонд установлен в валунно-галечных отложениях. Режим измерений – принудительная доставка радона. На данной станции, кроме неудачного расположения в валунно-галечных отложениях, присутствует отрицательное воздействие техногенных помех, влияющих на измеряемую величину ОАР (рис. 5). Проявление процесса подготовки землетрясений в кривой ОАР проявляется нечетко. За период с 20.07.2021 г. по 04.09.2021 г. произошло 3 землетрясения. Исходя из геодинамического критерия, они относятся к «дальней» зоне, но при анализе соотнести их с радоновыми аномалиями сложно как по амплитуде, так и по положению на кривой ОАР.

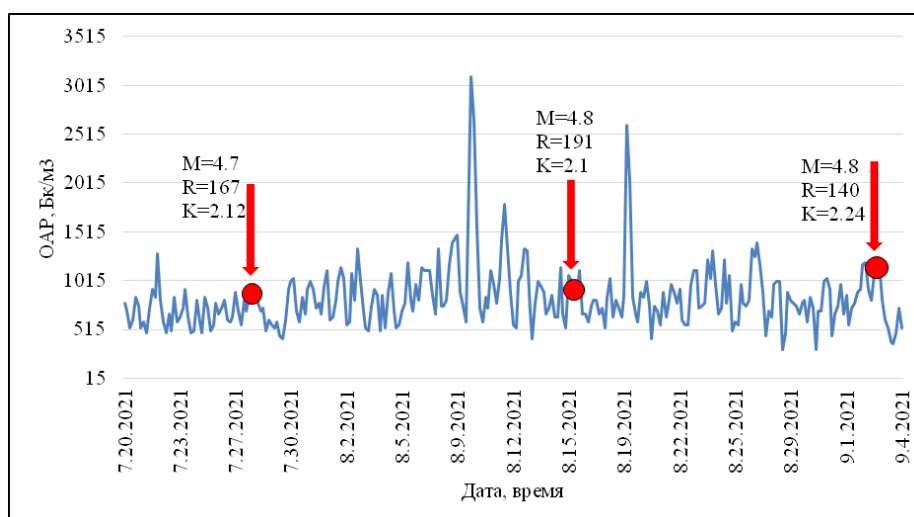


Рис. 5. Фрагмент записи кривой ОАР на станции Владикавказ /

Fig. 5. A fragment of the recording of the curve of the UAR at Vladikavkaz station

Станция Кызыл (Республика Тыва)

Расположена в пойменных и русловых отложениях реки Ка-Хем (Малый Енисей). Зонд установлен в грубообломочных пролювиальных отложениях, слабо передающих возникающие деформации. Измерения соответствуют режиму принудительной доставки радона. Пример записи приведен на рисунке 6. Видно, что характер вариаций ОАР затрудняет проведение их интерпретации. Величина аномалий незначительно превышает фоновые значения, что может быть объяснено удаленностью событий. Суточные вариации ОАР нечеткие, геодинамический критерий для дальних событий не достигает величины 2.0, при которой возможно их проявление в кривых ОАР. Практически все произошедшие в этот период землетрясения отмечаются как дальние. Близкое событие 15 сентября 2024 г. ориентировочно можно связать с незначительной аномалией 2–4 сентября. Хотя по величине геодинамического критерия – 2.43, данное землетрясение должно было уверенно проявиться в кривой ОАР. Основные причины нечетких аномалий – неудачное расположение радоновой станции и возможные технические помехи из-за ее размещения в здании Института.

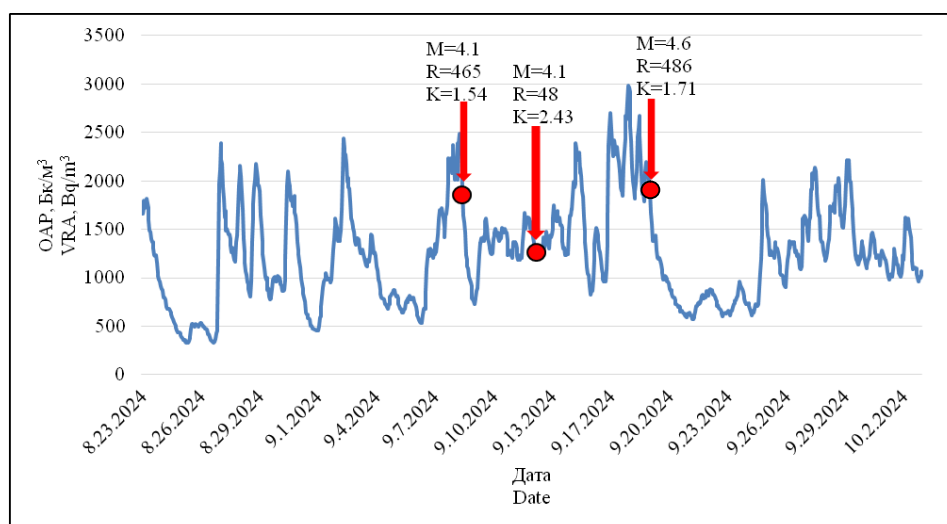


Рис. 6. Фрагмент записи кривой ОАР на станции Кызыл /

Fig. 6. A fragment of the recording of the curve of the VRA at the Kyzyl station

Станция «Иссык-Ата» (Кыргызстан)

Станция находится на Северном Тянь-Шане, в зоне складчато-разрывного сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины. Станция установлена в ~1 км от тальвега на правом борту р. Иссык-Ата в разнообломочных пролювиальных средне-верхнечетвертичных отложениях (rQ_{2-3}), лежащих на гранодиоритах ордовика с ксеноблоками верхнепротерозойских сланцев. Породы палеозойского фундамента сильно трещиноваты и с признаками дробления из-за близости (~1.5 км) линии Шамсинского взброса с падением его плоскости сместителя под углом 40–50° в сторону станции.

В подвальном помещении павильона Научной станции РАН установлена квадратная труба сечением 20 мм на 20 мм длиной 1 м с перфорированным основанием, заглублена на 0.6 м, в нее установлен зонд с выходящей из него трубкой с выходом в операторское помещение, где установлен прокачивающий насос и детектор радона. Такая схема установки зонда не соответствует режиму принудительной доставки радона. Наличие дополнительного объема за счет внешней квадратной трубы приводит к разбавлению и усреднению величины ОАР. Связь открытого конца квадратной трубы с помещением обуславливает поступление в нее воздуха с низким содержанием радона и при отключении насоса, детектор регистрирует содержание радона в воздухе помещения. При такой схеме измерений регистрация короткопериодных высокоамплитудных аномалий затруднительна, а получаемые вариации неприменимы для качественной интерпретации.

На рисунке 7 приведен фрагмент записи ОАР с 31.01.2023 г. по 19.02.2024 г. Произшедшие за этот промежуток времени землетрясения в ноябре 2023 г. и январе 2024 г., по геодинамическому критерию должны были отразиться в поле радона. Но процесс их подготовки не отразился в вариациях объемной активности почвенного радона, что, скорее всего, объясняется осреднением величины ОАР в дополнительном объеме – квадратной трубе.

Резкий спад величины ОАР после землетрясения 22.01.2024 г. вероятнее всего, вызван техническими неисправностями работы насоса или разгерметизацией соединительных элементов от зонда к детектору. На это указывают последующие фоновые значения ОАР.

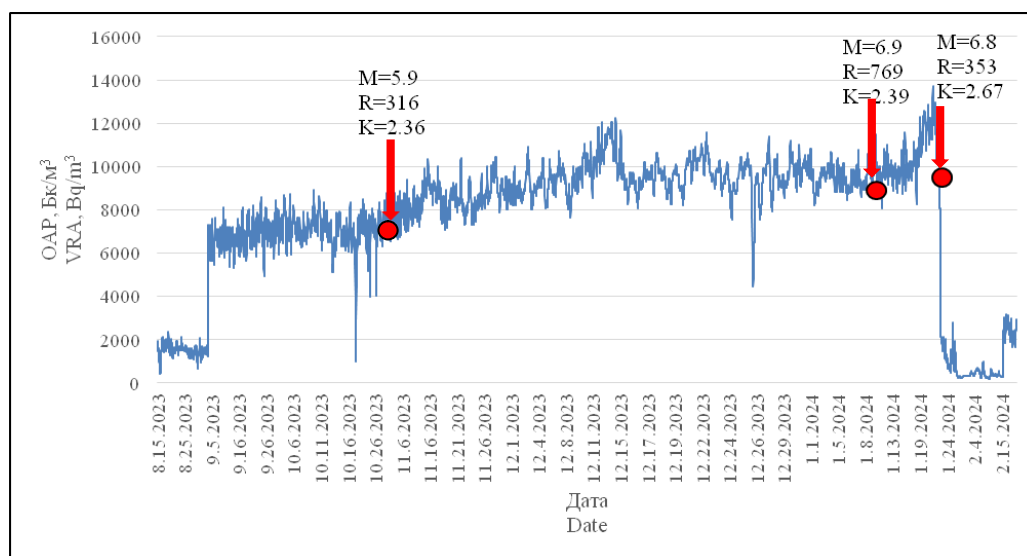


Рис. 7. Фрагмент записи кривой ОАР на станции «Иссык-Ата» /
Fig. 7. A fragment of the recording of the VRA curve at the «Issyk-Ata» station

Станция «Петропавловская» (о. Сахалин)

Пункт наблюдения в с. Петропавловское, расположен в южной части острова, непосредственно в зоне регионального субмеридионального Центрально-Сахалинского разлома. В структурном плане, разлом представляет собой взбросо-надвиг, с падением сместителя на запад под углом 55° . На земной поверхности его трасса ярко выражена наползанием резко пересеченного гористого рельефа, сложенного холмской и невеличской свитами, на западный фланг низменной равнины Сусунайской депрессии, заполненной Маруямскими отложениями. Непосредственно в месте установки шпура для отбора газовых проб, породы представлены аллювиально-пролювиальными желтыми и серыми глинами и суглинками современного четвертичного возраста с мощностью толщи до 4 м.

Условия измерений соответствуют режиму принудительной доставки радона. За период наблюдений с 17.10.2024 г. по 29.12.2024 г. отразилось только одно землетрясение 23.10.2024 г. с геодинамическим критерием 2.2 на расстоянии 928 км. В кривой ОАР оно отметилось как дальнейшее событие, на спаде аномалии, что соответствует полученным ранее закономерностям (рис. 8). Аномалии ОАР на этой станции имеют небольшое превышение над фоновыми значениями ОАР, что затрудняет их выделение. Возможной причиной этого может быть неудачное размещение зонда, под которым находится подвальное помещение, за счёт этого возможно искажение деформационной картины при подготовке землетрясения. Наблюдаемая высокая влажность объясняется условиями депрессионной воронки, возникающей из-за подвального помещения.

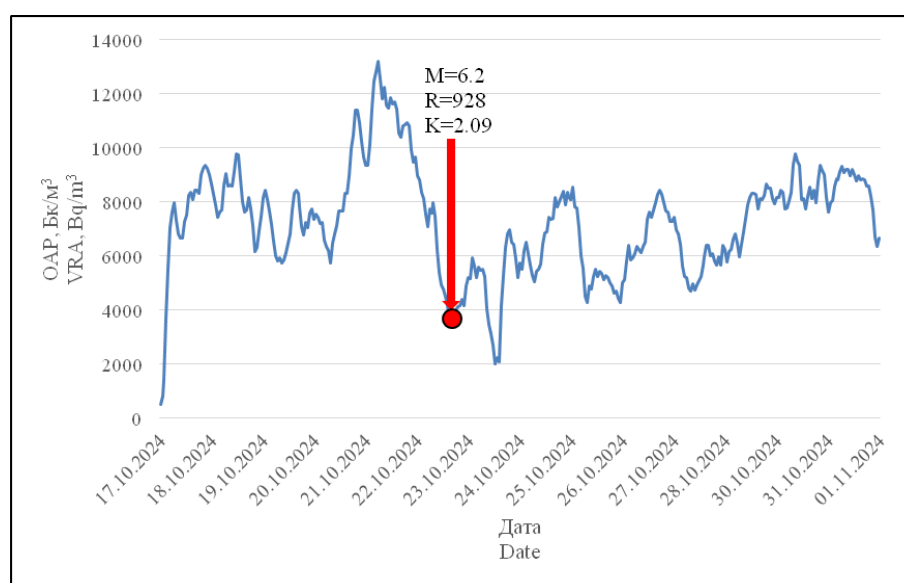


Рис. 8. Фрагмент записи ОАР на станции «Петропавловская», о. Сахалин /
Fig. 8. Fragment of the recording of the VRA at the Petropavlovsk station, Sakhalin Island

Выводы

Станции Южно-Курильск, Петропавловская, Коуровка и Кармадон расположены в коре выветривания монолитных горных пород, реагирующих изменением структуры трещинно-порового пространства при подготовке землетрясения, что отражается в кривой ОАР. Условия измерения полностью соответствуют режиму принудительной доставки почвенного радона к детектору. Отражения землетрясе-

ний в кривых объемной активности радона (ОАР), получаемых на этих станциях, укладываются в закономерности для «ближней» и «дальней» зон, полученные для зоны субдукции.

Станции в Кызыле (Саяны) и Владикавказе расположены в грубообломочных породах, плохо передающих деформации, и даже при измерениях в режиме принудительной доставки радона к детектору, не удается получать качественные кривые ОАР, пригодные для выделения закономерностей отражения в них процесса подготовки землетрясений.

Станция в Иссык-Ате не соответствует методике измерений в режиме принудительной конвекции из-за наличия дополнительного объема (объема наружной трубы) в системе доставки почвенного радона к детектору. Эта причина и учитывая то, что используемый насос для создания режима принудительной доставки радона, имеет незначительную производительность, не позволяет проследить в кривых ОАР процесс подготовки землетрясений.

Таким образом, при выборе места установки станций радонового мониторинга, необходимо учитывать геолого-тектонические условия точки мониторинга [Маркин, 2023; Zaalishvili et al., 2024]. Обустройство станции и проведение измерений необходимо осуществлять строго в соответствии с методикой режима принудительной доставки радона к детектору.

Правильно работающая сеть станций радонового мониторинга позволит получить количественные характеристики закономерностей отражения процесса подготовки землетрясения в вариациях объемной активности радона в различных геодинамических условиях.

Литература

1. Бирюлин С.В. Пространственно-временные закономерности проявления аномалий объёмной активности радона перед тектоническими землетрясениями в районе Южных Курил. Автореф. дисс. канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10 / Бирюлин Сергей Викторович. – Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2022. – 24 с.
2. Заалишвили В.Б., Бирюлин С.В., Козлова И.А., Мельков Д.А., Юрков А.К. Закономерности проявления аномалий объёмной активности радона перед землетрясениями в различных сейсмоактивных регионах. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 1. – С. 35–50. DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003.
3. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, – 2006. 242 с.
4. Козлова И.А., Юрков А.К. Методические вопросы измерения содержания радона-222 в почвенном воздухе при мониторинговых наблюдениях. // Уральский геофизический вестник. – 2005. – № 1. – С. 30–34.
5. Маркин М.Ю. Оценка объемной активности радона тектонических разломов в границах городской агломерации Усть-Каменогорск (Республика Казахстан). // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Vol. 13. No. 2. – pp. 29–39. DOI: 10.46698/VNC.2023.93.88.003.
6. Уткин В.И., Юрков А.К. Динамика выделения радона из массива горных пород как краткосрочный предвестник землетрясения. // Доклады РАН. – 1998. – Т. 358. № 5. – С. 675–680.
7. Фирстов П.П., Макаров Е.О. Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2018. – 148 с.
8. Favara R., Grassa F., Inguaggiato S., Valenza M. Hydrogeochemistry and stable isotopes of thermal springs: earthquake-related chemical changes along Belice Fault (Western Sicily). // Applied Geochemistry. – 2001. – Vol. 16. No. 1. – pp. 1–17.

9. Gregoric A., Zmazek B., Vaupotic J. Radon concentration in the thermal water as an indicator of seismic activity. // *Collegium Antropologicum*. – 2008. – No. 32. – pp. 95–98.
10. Hatuda Z. Radon content and its change in soil air near the ground surface. // *Memoirs of the College of Science, University of Kyoto*. – 1953. – Ser. B. Vol. 20. – pp. 285–306.
11. Kasahara K. Migration of crustal deformation. // *Tectonophysics*. – 1979. – Vol. 52. No. 1-4. – pp. 329–341.
12. King C.-Y. King B.-S., William C.E., Zhanget W. Spatial radon anomalies on active faults in California. // *Applied Geochemistry*. – 1996. – Vol. 11. Issue 4. – pp. 497–510.
13. Kuo T., Su C., Chang Ch., Lin Ch. et al. Application of recurrent radon precursors for forecasting large earthquakes ($M_w > 6.0$) near Antung, Taiwan. // *Radiation Measurements*. – 2010. – Vol. 45. No. 9. – pp. 1049–1054.
14. Mogro-Campero A., Fleischer R.L., Likes R.S. Changes in subsurface radon concentration associated with earthquakes. // *Journal of Geophysical Research*. – 1980. – Vol. 85. No. NB6. – pp. 3053–3057.
15. Oh Y., Kim G. A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor. // *Scientific Reports*. – 2015. – No. 5. – Art. No. 13084. DOI: 10.1038/srep13084.
16. Omori Y., Yasuoka Y., Nagahama H., Kawada Y., et al. Anomalous radon emanation linked to preseismic electromagnetic phenomena. // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2007. – No. 7. – pp. 629–635.
17. Planinic J., Radolic V., Lazanin Z. Temporal variations of radon in soil related to earthquakes. // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2001. – Vol. 55. No. 2. – pp. 267–272.
18. Ramola R.C., Singh M., Sandhu A.S., Singh Sh.V. et al. The use of radon as an earthquake precursor. // *Nuclear Geophysics*. – 1990. – Vol. 4. No. 2. – pp. 275–287.
19. Reddy D.V., Nagabhushanam P. Groundwater electrical conductivity and soil radon gas monitoring for earthquake precursory studies in Koyna, India. // *Applied Geochemistry*. – 2011. – Vol. 26. No. 5. – pp. 731–737.
20. Singh M., Kumar M., Jain R.K., Chatrath R.P. Radon in ground water related to seismic events. // *Radiation Measurements*. – 1999. – Vol. 30. No. 4. – pp. 465–469.
21. Teng T. Some recent studies on groundwater radon content as an earthquake precursor. // *Journal of Geophysical Research*. – 1980. – Vol. 6. No. 85. – pp. 3089–3099.
22. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Martyushev N.V. Klyuev R.V., Kukartsev V.V., Konyukhov V.Yu., Kononenko R.V., Gendon A.L., Oparina T.A. Radon emanation and dynamic processes in highly dispersive media. // *Geosciences (Switzerland)*. – 2024. – Vol. 14. No. 4. – pp. 102. DOI 10.3390/geosciences14040102.

References

1. Biryulin S.V. Spatial and temporal patterns manifestations of volume radon anomalies before tectonic earthquakes in the South Kuril Islands. The abstract of the dissertation of Cand. Geol.-mineral. Sci. Ekaterinburg. IGF UB RAS. 2022. 24 p. (In Russ.)
2. Zaalishvili V.B., Biryulin S.V., Kozlova I.A., Melkov D.A., Yurkov A.K. Anomalies of radon volumetric activity before earthquakes in various seismically active regions. *Geologiya Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 35–50. DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003. (In Russ.)
3. Zavyalov A.D. Medium-term earthquake forecast: fundamentals, methodology, implementation. Moscow. Nauka. 2006. 242 p. (In Russ.)
4. Kozlova I.A., Yurkov A.K. The Methodic problems of concentration of Radon-222 measuring in soil air during monitoring organisation. *Ural Geophysical Bulletin*. 2005. No. 1. pp. 30–34. (In Russ.)
5. Markin M.Yu. Assessment of radon volumetric activity of tectonic faults within the boundaries of the Ust-Kamenogorsk urban agglomeration (Republic of Kazakhstan). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 29–39. DOI: 10.46698/VNC.2023.93.88.003. (In Russ.)

6. Utkin V.I., Yurkov A.K. Dynamics of radon release from a rock mass as a short-term precursor to an earthquake. *Doklady RAS*. 1998. Vol. 358. No. 5. pp. 675–680. (In Russ.)
7. Firstov P.P., Makarov E.O. Dynamics of subsurface radon in Kamchatka and strong earthquakes. *Petropavlovsk-Kamchatsky. Vitus Bering KamSU*. 2018. 148 p. (In Russ.)
8. Favara R., Grassa F., Inguaggiato S., Valenza M. Hydrogeochemistry and stable isotopes of thermal springs: earthquake-related chemical changes along Belice Fault (Western Sicily). *Applied Geochemistry*. 2001. Vol. 16. No. 1. pp. 1–17.
9. Gregoric A., Zmazek B., Vaupotic J. Radon concentration in the thermal water as an indicator of seismic activity. *Collegium Antropologicum*. 2008. No. 32. pp. 95–98.
10. Hatuda Z. Radon content and its change in soil air near the ground surface. *Memoirs of the College of Science. University of Kyoto*. 1953. Ser. B. Vol. 20. pp. 285–306.
11. Kasahara K. Migration of crustal deformation. *Tectonophysics*. 1979. Vol. 52. No. 1-4. pp. 329–341.
12. King C.-Y. King B.-S., William C.E., Zhanget W. Spatial radon anomalies on active faults in California. *Applied Geochemistry*. 1996. Vol. 11. Issue 4. pp. 497–510.
13. Kuo T., Su C., Chang Ch., Lin Ch. et al. Application of recurrent radon precursors for forecasting large earthquakes ($M_w > 6.0$) near Antung, Taiwan. *Radiation Measurements*. 2010. Vol. 45. No. 9. pp. 1049–1054.
14. Mogro-Campero A., Fleischer R.L., Likes R.S. Changes in subsurface radon concentration associated with earthquakes. *Journal of Geophysical Research*. 1980. Vol. 85. No. NB6. pp. 3053–3057.
15. Oh Y., Kim G. A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor. *Scientific Reports*. 2015. No. 5. Art. No. 13084. DOI: 10.1038/srep13084.
16. Omori Y., Yasuoka Y., Nagahama H., Kawada Y., et al. Anomalous radon emanation linked to preseismic electromagnetic phenomena. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2007. No. 7. pp. 629–635.
17. Planinic J., Radolic V., Lazanin Z. Temporal variations of radon in soil related to earthquakes. *Applied Radiation and Isotopes*. 2001. Vol. 55. No. 2. pp. 267–272.
18. Ramola R.C., Singh M., Sandhu A.S., Singh Sh.V. et al. The use of radon as an earthquake precursor. *Nuclear Geophysics*. 1990. Vol. 4. No. 2. pp. 275–287.
19. Reddy D.V., Nagabhushanam P. Groundwater electrical conductivity and soil radon gas monitoring for earthquake precursory studies in Koyna, India. *Applied Geochemistry*. 2011. Vol. 26. No. 5. pp. 731–737.
20. Singh M., Kumar M., Jain R.K., Chatrath R.P. Radon in ground water related to seismic events. *Radiation Measurements*. 1999. Vol. 30. No. 4. pp. 465–469.
21. Teng T. Some recent studies on groundwater radon content as an earthquake precursor. *Journal of Geophysical Research*. 1980. Vol. 6. No. 85. pp. 3089–3099.
22. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Kukartsev V.V., Konyukhov V.Yu., Kononenko R.V., Gendon A.L., Oparina T.A. Radon emanation and dynamic processes in highly dispersive media. *Geosciences (Switzerland)*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 102. DOI 10.3390/geosciences14040102.

УДК 550.34; 539.3

DOI: 10.46698/VNC.2025.25.51.004

Оригинальная статья

О предвестнике повышенной сейсмичности в области перехода горной территории в равнинную

В.А. Бабешко¹, О.В. Евдокимова², О.М. Бабешко¹,
В.С. Евдокимов¹, М.В. Зарецкая¹, Д.В. Хрипков¹

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: 27.11.2024, доработана: 11.02.2025, принята к публикации: 14.02.2025

Резюме: Актуальность работы состоит в необходимости дальнейшего поиска предвестников повышенной сейсмичности 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 повышенной 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 вместе с коренными породами 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. Авторам работы удалось установить общий вид решений двумерного интегрального уравнения Винера-Хопфа с анизотропным символом, доказать его удовлетворение интегральному уравнению. Случай деформируемого штампа впервые рассматривается в настоящей работе. 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. Наибольший рост концентрации контактных напряжений отмечается при приближении к вершине угла деформируемого штампа. Получены функции, описывающие нарастание концентраций напряжений.

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

Благодарность: 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., Зарецкая М.В., Хрипков Д.В. О предвестнике повышенной сейсмичности в области перехода горной территории в равнинную. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 45-55. DOI: 10.46698/VNC.2025.25.51.004

DOI: 10.46698/VNC.2025.25.51.004

Original paper

About the precursor of increased seismicity in the area of transition of the mountainous territory to the plain

V.A. Babeshko¹, O.V. Evdokimova², O.M. Babeshko¹, V.S. Evdokimov¹,
M.V. Zaretskaya¹, D.V. Khripkov¹

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

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

Received: 27.11.2024, revised: 11.02.2025, accepted: 14.02.2025

Abstract: The relevance of the paper lies in the need for further search for precursors of increased seismicity 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 zone of increased seismicity in the area of transition from a mountainous territory to the plain. **Methods.** The solution of the contact problem on the concentration of contact stresses in the transition zone of a mountain range to the plain area was used for the study. It is assumed that the mountain range towering above the plain is modeled by a deformable stamp, which, together with the bedrock, is located on an anisotropic half-space characteristic of the structure of the granite layer of the lithospheric plate. The paper takes into account tidal Moon 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. The authors of the study succeeded in establishing the general form of solutions of the two-dimensional Wiener-Hopf integral equation with an anisotropic symbol, and in proving its satisfaction to the integral equation. The case of a deformable stamp is considered for the first time in this paper. 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. The greatest increase in the concentration of contact stresses is observed when approaching the top of the angle of the deformable die. Functions describing the increase in stress concentrations are obtained.

Keywords: contact problem, deformable stamps, increased seismicity, stress concentration, mountainous areas.

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

For citation: 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. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 45-55. DOI: 10.46698/VNC.2025.25.51.004

Введение

В работе исследование сейсмичности в области перехода горной территории в равнинную на предмет разрушения среды выполняется, следуя научным рекомендациям выдающихся ученых академиков Г.А. Гамбурцева и М.А. Садовского. Г.А. Гамбурцеву принадлежит следующее высказывание [Гамбурцев, 1982]: «Изыскание методов прогноза времени землетрясений следует направить в первую очередь в сторону поиска механических предвестников землетрясений. Такие поиски могут быть успешными только в том случае, если они будут основываться на глубоко изучении всех деталей механизма быстрых и медленных движений блоков земной коры сейсмоактивных районов». М.А. Садовскому [Садовский и др., 1987] принадлежит утверждение о невозможности прогноза землетрясений, основываясь лишь на слоистом строении коры Земли; необходимо учитывать реально существующие блочные модели. Именно эти рекомендации положены в основу изучаемого подхода прогноза уровня сейсмичности в горно-равнинных территориях. Вместе с прекрасными работами 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 и др.], успешно применявших глубокие механико-математические методы в геофизике, в настоящей работе развивается еще один механико-математический подход, опирающийся на последние достижения в механике контактного взаимодействия.

В частности, в работе [Заалишвили и др., 2021] 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; Arhore 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 предвестник землетрясений, связанных с приливными колебаниями. В настоящей работе продолжен поиск, при таких же внешних воздействиях, возможных новых предвестников повышенной сейсмичности механического типа в горно-равнинных территориях.

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, по-

звolyающего 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 (рис. 1), 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.

Граничная задача для деформируемого штампа

Рассмотрим граничную задачу для уравнения Гельмгольца, моделирующего материал деформируемого штампа простой реологии

$$(\Delta + k) \psi(x, y) = q(x, y) - t(x, y), \quad k = c\omega, \quad c = \text{const} \quad (1)$$

Здесь Δ – оператор Лапласа, $\psi(x, y)$ – решение граничной задачи для уравнений Гельмгольца, $q(x, y)$ – воздействие на штамп со стороны многослойной среды в области контакта, $t(x, y)$ – внешнее воздействие на штамп сверху, например атмосферное давление или слой жидкости в подводном варианте. Для уравнения Гельмгольца ставится граничная задача Дирихле в предположении, что на границах задаются граничные условия вида

$$\psi_1(x, y) = \psi_1(0, y), \quad \psi_2(x, y) = \psi_2(x, 0) \quad (2)$$

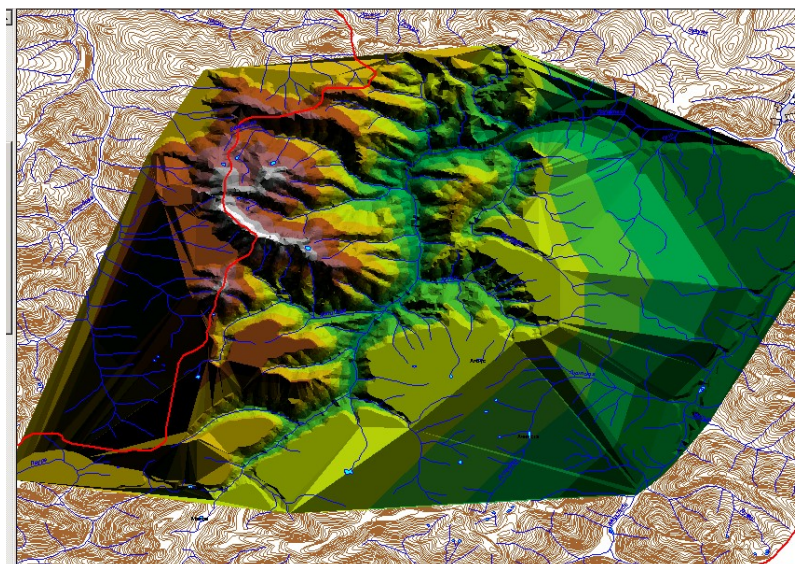


Рис. 1. Фрагмент горно-равнинной зоны на территории Краснодарского края /
Fig. 1. A fragment of a mountain-plain zone on the territory of the Krasnodar Territory

Вводится обозначение $s(x, y) = q(x, y) - t(x, y)$. Алгоритм метода блочного элемента, включающий этапы внешней алгебры, внешнего анализа и фактор-топологий, для совокупности блоков, описан во многих работах. После его применения к рассматриваемой граничной задаче, получаем, с учетом (1), (2) внешнюю форму в преобразовании Фурье, в виде

$$\omega(\alpha, \beta) = \left[\frac{\alpha}{\alpha_+} - 1 \right] \langle \Psi_1(0, \beta) - \Psi_1(0, \beta_+) \rangle + \left[\frac{\beta}{\beta_+} - 1 \right] \langle \Psi_2(\alpha, 0) - \Psi_2(\alpha_+, 0) \rangle + S(\alpha, \beta, \alpha_+, \beta_+) \quad (3)$$

Здесь принято обозначение

$$\begin{aligned} S(\alpha, \beta, \alpha_+, \beta_+) = & -Q(\alpha, \beta) - \frac{\alpha\beta}{\alpha_+\beta_+} Q(\alpha_+, \beta_+) + \frac{\alpha}{\alpha_+} Q(\alpha_+, \beta) + \frac{\beta}{\beta_+} Q(\alpha, \beta_+) + \\ & + T(\alpha, \beta) + \frac{\alpha\beta}{\alpha_+\beta_+} T(\alpha_+, \beta_+) - \frac{\alpha}{\alpha_+} T(\alpha_+, \beta) - \frac{\beta}{\beta_+} T(\alpha, \beta_+) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\alpha_+ = i\sqrt{\beta^2 - k^2}, \quad \beta_+ = i\sqrt{\alpha^2 - k^2}, \quad \operatorname{Re}\sqrt{\alpha^2 - k^2} > 0, \quad \operatorname{Re}\sqrt{\beta^2 - k^2} > 0$$

В дальнейшем, ради краткости, если не будет оговорено отдельно, прописными буквами будем обозначать преобразование Фурье от функций, обозначенных строчными буквами, например,

$$N(\alpha, \beta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} n(x, y) e^{i(\alpha x + \beta y)} dx dy, \quad n(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} N(\alpha, \beta) e^{-i(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta,$$

Первые четыре члена справа у функции $S(\alpha, \beta, \alpha_+, \beta_+)$ представляют преобразования Фурье неизвестного контактного напряжения $Q(\alpha, \beta)$ и неизвестные функционалы $Q(\alpha_+, \beta_+)$, $Q(\alpha_+, \beta)$, $Q(\alpha, \beta_+)$ от искомого контактного напряжения. Остальные члены справа представляют преобразования Фурье и функционалы от задаваемых внешних воздействий.

Интегральное уравнение контактной задачи

Рассматривается интегральное уравнение Винера-Хопфа, заданное в первом квадранте [Ворович, Бабешко, 1979]. Оно имеет вид (рис. 2):

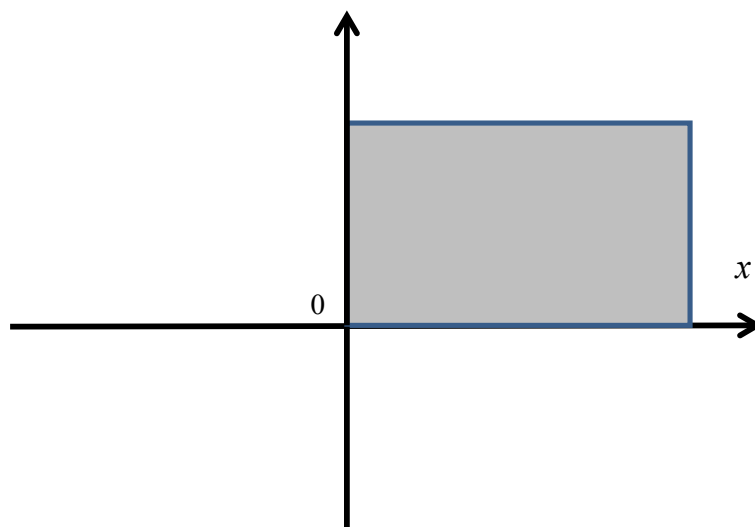


Рис. 2. На рисунке изображена часть неограниченной области первого квадранта, занятой деформируемым штампом /

Fig. 2. The figure shows a part of the unlimited area of the first quadrant occupied by a deformable stamp

$$\mathbf{M}q = \int_0^\infty \int_0^\infty m(x-\xi, y-\eta) q(\xi, \eta) d\xi d\eta = p(x, y), \quad 0 \leq x \leq \infty, \quad 0 \leq y \leq \infty$$

$$m(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{\Gamma_1} \int_{\Gamma_2} M(\alpha, \beta) e^{-i(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta, \quad Q(\alpha, \beta) = \int_0^\infty \int_0^\infty q(\xi, \eta) e^{i(\alpha \xi + \beta \eta)} d\xi d\eta$$

$$P(\alpha, \beta) = \int_0^\infty \int_0^\infty p(\xi, \eta) e^{i(\alpha \xi + \beta \eta)} d\xi d\eta$$

Здесь $q(x, y)$ – искомые контактные напряжения под штампом, $p(x, y)$ – функция, описывающая внедрение подошвы штампа в среду.

Функция $M(\alpha, \beta)$, в общем случае комплекснозначная, порождается решением анизотропной граничной задачи в многослойной среде, является непрерывной и суммируемой на осях по обоим аргументам, с поведением на бесконечности вида:

$$M(\alpha, \beta) = O(\alpha^{-1}), \quad \beta = \text{const}; \quad M(\alpha, \beta) = O(\beta^{-1}), \quad \alpha = \text{const}, \quad |\alpha|, |\beta| \rightarrow \infty, \quad (6)$$

Здесь Γ_1, Γ_2 – контуры, лежащие на вещественной оси и отклоняющиеся от нее в динамических задачах гармонической во времени вибрации лишь обходя вещественные полюса, по малым полуокружностям, если они возникают [Бабешко и др., 1989].

Метод решения

Составим интегральное уравнение для определения контактных напряжений под деформируемым штампом. Для этого с учетом формул (1)–(4) представим перемещение $\varphi(x, y)$ деформируемого штампа в области контакта в виде упакованного блочного элемента. Имеем:

$$\psi(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{\Gamma_1} \int_{\Gamma_2} \frac{\omega(\alpha, \beta) e^{-i(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta}{\alpha^2 + \beta^2 - k^2} \quad (7)$$

Преобразуем представление внешней формы, разделив в ней неизвестные и заданные составляющие. Имеем:

$$\begin{aligned} \omega(\alpha, \beta) &= -Q(\alpha, \beta) + Q_1(\alpha, \beta) + G(\alpha, \beta) \\ Q_1(\alpha, \beta) &= -\frac{\alpha\beta}{\alpha_+\beta_+} Q(\alpha, \beta) + \frac{\alpha}{\alpha_+} Q(\alpha_+, \beta) + \frac{\beta}{\beta_+} Q(\alpha, \beta_+) \\ G(\alpha, \beta) &= T(\alpha, \beta) + \frac{\alpha\beta}{\alpha_+\beta_+} T(\alpha_{1+}, \alpha_{2+}) - \frac{\alpha}{\alpha_+} T(\alpha_+, \beta) - \frac{\beta}{\beta_+} T(\alpha, \beta_+) + \\ &+ \left[\frac{\alpha}{\alpha_+} - 1 \right] \langle \Psi_1(0, \beta) - \Psi_1(0, \beta_+) \rangle + \left[\frac{\beta}{\beta_+} - 1 \right] \langle \Psi_2(\alpha, 0) - \Psi_2(\alpha_+, 0) \rangle \end{aligned} \quad (8)$$

Приравняем вертикальные перемещения (5) поверхности многослойной среды $p(x, y)$ параметрам вертикального перемещения (7) $\varphi(x, y)$ деформируемого штампа снизу. Применив к этому равенству преобразование Фурье, получим, с учетом (8), соотношение вида:

$$\frac{-Q(\alpha, \beta) + Q_1(\alpha, \beta) + G(\alpha, \beta)}{\alpha^2 + \beta^2 - k^2} = M(\alpha, \beta) Q(\alpha, \beta)$$

В результате приходим к функциональному уравнению, введя обозначение функций $K(\alpha, \beta)$, $F(\alpha, \beta)$:

$$K(\alpha, \beta)Q(\alpha, \beta) = \frac{Q_1(\alpha, \beta) + G(\alpha, \beta)}{\alpha^2 + \beta^2 - k^2}, \quad K(\alpha, \beta) = M(\alpha, \beta) + (\alpha^2 + \beta^2 - k^2)^{-1} \quad (9)$$

$$F(\alpha, \beta) = [Q_1(\alpha, \beta) + G(\eta_1, \eta_2)](\alpha^2 + \beta^2 - k^2)^{-1}$$

Применив к соотношению (9) обращение Фурье, с учетом (5), получаем интегральное уравнение контактной задачи о действии деформируемого штампа на многослойную среду в виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}q &= \int_0^\infty \int_0^\infty k(x - \xi, y - \eta) q(\xi, \eta) d\xi d\eta = f(x, y), \quad 0 \leq x \leq \infty, \quad 0 \leq y \leq \infty \\ k(x, y) &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{\Gamma_1} \int_{\Gamma_2} K(\alpha, \beta) e^{-i(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta, \quad Q(\alpha, \beta) = \int_0^\infty \int_0^\infty q(\xi, \eta) e^{i(\alpha \xi + \beta \eta)} d\xi d\eta \quad (10) \\ F(\alpha, \beta) &= \int_0^\infty \int_0^\infty f(\xi, \eta) e^{i(\alpha \xi + \beta \eta)} d\xi d\eta \end{aligned}$$

Воспользуемся недавно полученным решением двумерного интегрального уравнения Винера-Хопфа, вида (10), в контактной задаче для абсолютно жесткого штампа. В настоящей работе оно впервые применяется для случая деформируемого штампа в виде, удобном для механического анализа

$$\begin{aligned} q(x, y) &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{\Gamma_1} \int_{\Gamma_2} Q(\alpha, \beta) e^{-i(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta \\ Q(\alpha, \beta) &= K^{-1}F - \frac{1}{2} \left[K_{+\alpha}^{-1} \left\{ K_{-\alpha}^{-1}F \right\}_{-\alpha} + K_{+\beta}^{-1} \left\{ K_{-\beta}^{-1}F \right\}_{-\beta} + \right. \\ &\quad \left. + K_{+\alpha+\beta}^{-1} \left\{ K_{+\alpha-\beta}^{-1} \left\{ K_{-\alpha}^{-1}F \right\}_{+\alpha} \right\}_{-\beta} + K_{+\beta+\alpha}^{-1} \left\{ K_{+\beta-\alpha}^{-1} \left\{ K_{-\beta}^{-1}F \right\}_{+\beta} \right\}_{-\alpha} \right] \quad (11) \end{aligned}$$

Вид операторов факторизации, участвующих в (11) приведен в [Ворович, Бабешко, 1979] и здесь не повторяется.

Результат исследования

Полученное представление позволяет описать составляющие решения (11) по их роли в представлении поведения контактных напряжений под штампом. После вычисления интеграла обратного преобразования Фурье в (11) функция $K^{-1}F$ описывает вырожденную составляющую контактных напряжений под штампом, которая формируется вдали от границ штампа. Она приближенно равна решению уравнения свертки, возникающему в случае, если штамп не имеет границ и занимает все четыре квадранта.

Составляющая $K_{+\alpha}^{-1} \left\{ K_{-\alpha}^{-1}F \right\}_{-\alpha} + K_{+\beta}^{-1} \left\{ K_{-\beta}^{-1}F \right\}_{-\beta}$ описывает концентрацию контактных напряжений при приближении изнутри к прямолинейным границам штампа $x = 0$ или $y = 0$. Эта концентрация контактных напряжений совпадает с описываемой в [Ворович, Бабешко, 1979] при приближении к границе полуплоскостного штампа, которая является прямой линией. Асимптотическое вычисление

интеграла (11) у границ дает особенности вида $c_1(y)x^{-1/2}$ и $c_2(x)y^{-1/2}$ соответственно. Здесь функции $c_1(y)$, $c_2(x)$ являются непрерывными от своих параметров.

Составляющая $K_{+\alpha+\beta}^{-1} \{ K_{+\alpha-\beta}^{-1} \{ K_{-\alpha}^{-1} F \}_{+\alpha} \}_{-\beta} + K_{+\beta+\alpha}^{-1} \{ K_{+\beta-\alpha}^{-1} \{ K_{-\beta}^{-1} F \}_{+\beta} \}_{-\alpha}$ при одновременном поведении $x \rightarrow 0$ и $y \rightarrow 0$ позволяет вычислить поведение концентрации контактных напряжений в угловой точке штампа. С учетом свойств символа ядра интегрального уравнения (6) поведение концентрации контактных напряжений в угловой точке описывается функцией $c_3(r^{-3/4})$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$. Значение $-3/4$ близко величине, вычисленной ранее приближенным численным методом в [Бабешко и др., 1989, стр. 129] для абсолютно твердого штампа, и может быть сопоставлено при $\theta = 0,25$ с кривыми рисунка 3.

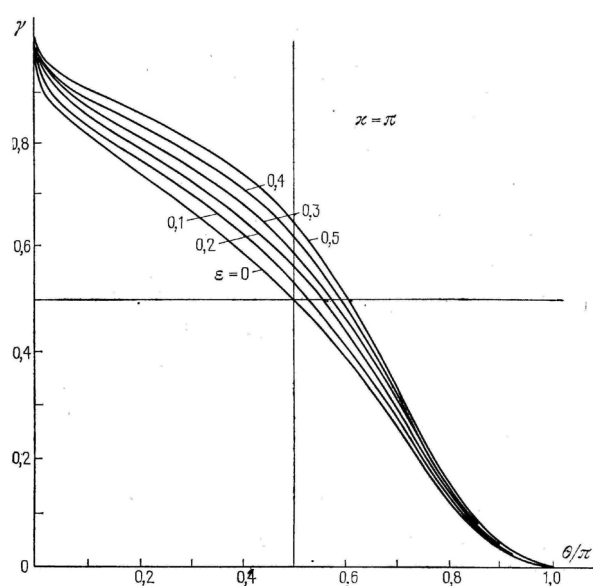


Рис. 3. Поведение параметра особенности γ в угловой точке штампа для разных коэффициентов трения ε . Для сравнения с результатом статьи необходимо брать $\varepsilon = 0$, $\theta/\pi = 0,25$ /

Fig. 3. Behavior of the feature parameter at the angular point of the die for different coefficients of friction ε . To compare with the result of the article, it is necessary to take $\varepsilon = 0$, $\theta/\pi = 0,25$

Таким образом, получено, что угловые точки деформируемого штампа также имеют в угловой точке максимальную концентрацию контактных напряжений. Опираясь на полученные результаты, можем заключить следующее: установлено, что в выбранной модели, имитирующей горно-равнинный ландшафт с границей горной гряды, имеющей угловые и прямолинейные участки, наиболее уязвимыми зонами являются зоны угловых точек, затем зоны прямолинейных границ. Именно они, в условиях вибрации от лунных приливных явлений, также являются зонами повышенной сейсмичности, подобно резонансным.

Выводы

Достоинством полученного результата является возможность моделирования сложных ландшафтных деформируемых объектов блочными элементами, позволяющими переходить к моделям более сложных реологий. Это позволяет не только

получать качественную картину процессов, протекающих под горными грядками, но и вычислять коэффициенты c_n , $n = 1, 2, 3$ перед особенностями, что дает возможность выполнять прогнозные заключения при их различных поведеньях.

Литература

1. Бабешко В.А., Глушков Е.В., Зинченко Ж.Ф. Динамика неоднородных линейно-упругих сред. М.: Наука, 1989. – 344 с.
2. Ворович И.И., Бабешко В.А. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М.: Наука, 1979. – 320 с.
3. 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.
4. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Габараев А.Ф., Мерзликин Т.И. Нелинейные колебания грунтовой толщи по инструментальным и численным данным. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 4. – С. 70–82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006.
5. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. – 104 с.
6. Чернов Ю.К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической оценки территории. Ташкент: Фан, 1989. – 296 с.
7. 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. 11107. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2021.111078.
8. Awrejcewicz J., Krysko V.A., Mityukovich 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. 103669. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2021.103669.
9. 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.
10. 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.
11. Fernandez L., Novotny A.A., Prakash R., Sokołowski J. Pollution sources reconstruction based on the topological derivative method. // Applied Mathematics & Optimization. – 2021. – Vol. 84. – pp. 1493–152. DOI: 10.1007/s00245-020-09685-0.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.

17. 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.
18. Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: a physical basis. // *Science*. – 1973. – Vol. 181. No. 4102. – pp. 803–810.
19. 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. 112974. DOI: 10.1016/j.cma.2020.112974.
20. Xia K., Rosakis A.J., Kanamori H. Laboratory Earthquakes: The Sub-Rayleigh-to-Supershear Rupture Transition. // *Science*. – 2004. – Vol. 303. – pp. 1859–1861.
21. 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., Glushkov E.V., Zinchenko J.F. Dynamics of inhomogeneous linear elastic media. Moscow. Nauka. 1989. 344 p. (In Russ.)
2. Vorovich I.I., Babeshko V.A. Dynamic mixed problems of elasticity theory for non-classical domains. Moscow. Nauka. 1979. 320 p. (In Russ.)
3. 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.)
4. 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.)
5. 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.)
6. Chernov Yu.K. Strong ground motions and quantitative assessment of the seismic assessment of the territory. Tashkent. Fan. 1989. 296 p. (In Russ.)
7. Arhore E.G., Yasae 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. 11107. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2021.111078.
8. 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. 103669. DOI: 10.1016/j.jnnonlinmec.2021.103669.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.

14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: a physical basis. *Science*. 1973. Vol. 181. No. 4102. pp. 803–810.
19. 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. 112974. DOI: 10.1016/j.cma.2020.112974.
20. Xia K., Rosakis A.J., Kanamori H. Laboratory Earthquakes: The Sub-Rayleigh-to-Supershear Rupture Transition. *Science*. 2004. Vol. 303. pp. 1859–1861.
21. 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 622.273:65.011.12

DOI: 10.46698/VNC.2025.55.34.005

Оригинальная статья

Сейсмобезопасные технологии подземной разработки рудных месторождений

В.И. Голик 

Московский политехнический университет, Россия, 107023,
г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38, e-mail: v.i.golik@mail.ru

Статья поступила: 05.02.2025, доработана: 04.03.2025, принята к публикации: 07.03.2025

Резюме: Рассмотрены условия применения сейсмобезопасных технологий при разработке рудных месторождений. Дана оценка сейсмического действия взрыва на подземные и поверхностные объекты инфраструктуры предприятия, обоснованы мероприятия по снижению сейсмического действия взрыва при разработке месторождений. **Актуальность исследований** определяется необходимостью повышения качества добываемых руд и ослабления вредного влияния производства на экологическую обстановку региона. **Цель исследований.** Совершенствование научных основ природоохранных и ресурсосберегающих технологий разработки рудных месторождений. **Методы исследований.** Данные о поведении массивов металлосодержащих пород исследованы известными статистическими методами. **Результаты исследований.** Показана важность учета сейсмического действия взрыва при использовании сейсмобезопасных технологий разработки месторождений для сохранения инфраструктуры предприятий. Обобщены сведения о допустимой скорости смещения для сооружений. Показано, что скорость смещения земной поверхности является функцией массы заряда ВВ. Детализирована стабилизирующая и ограничительная роль заполнения выработанного пространства твердеющими смесями, природными и наведенными напряжениями в управлении напряжениями, а также направленности фронта взрывной волны. Даны модели для расчета сейсмобезопасной массы заряда для объектов инфраструктуры и горных выработок. Даны рекомендации по управлению интенсивностью сейсмических колебаний под воздействием технологических факторов. Предложен критерий оценки опасности сейсмического действия взрыва в виде скорости смещения пород. Обобщены сведения о сейсмобезопасной массе заряда при взрыве его в скважине. Разработаны регламент и периодичность мониторинга состояния рудовмещающего массива и инфраструктуры над ним. Результаты исследования представляют интерес для разработки твердых полезных ископаемых.

Ключевые слова: рудные месторождения, породный массив, сейсмика, взрыв, мониторинг, геофизика.

Для цитирования: Голик В.И. Сейсмобезопасные технологии подземной разработки рудных месторождений. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 56-64. DOI: 10.46698/VNC.2025.55.34.005

DOI: 10.46698/VNC.2025.55.34.005

Original paper

Earthquake safe technologies of underground mining of ore deposits

V.I. Golik 

Moscow Polytechnic University, 38 B. Semenovskaya Str., Moscow 107023,
Russian Federation, e-mail: v.i.golik@mail.ru

Received: 05.02.2025, revised: 04.03.2025, accepted: 07.03.2025

Abstract: The conditions for the use of earthquake-safe technologies in the development of ore deposits are considered. An assessment of the seismic effect of the explosion on the underground and surface infrastructure facilities of the enterprise is given, and measures to reduce the seismic effect of the explosion during field development are substantiated. **The relevance** of the research is determined by the need to improve the quality of the extracted ores and reduce the harmful effects of production on the ecological situation of the region. **Aim.** Improvement of the scientific foundations of environmental protection and resource-saving technologies for the development of ore deposits. **Methods.** Data on the behavior of arrays of metal-bearing rocks have been studied by well-known statistical methods. **Results.** The importance of taking into account the seismic effect of an explosion when using earthquake-safe field development technologies to preserve its infrastructure is shown. Information about the permissible displacement velocity for structures has been provided. It is shown that the rate of displacement of the Earth's surface is a function of the mass of the explosive charge. The stabilizing and restrictive role of filling the developed space with hardening mixtures by natural and induced stresses in stress management, as well as the direction of the blast wave front, is detailed. Models for calculating the earthquake-safe charge mass for infrastructure facilities and mining operations are given. Recommendations on managing the intensity of seismic vibrations under the influence of technological factors are given. A criterion for assessing the danger of the seismic effect of an explosion in the form of a rock displacement rate is proposed. The information about the earthquake-safe mass of the charge during their explosion in wells is summarized. The regulations and frequency of monitoring the state of the ore-bearing massif and the infrastructure above it have been developed. The results of the study are of interest for the development of solid minerals.

Keywords: ore deposits, rock mass, seismic, explosion, monitoring, geophysics.

For citation: Golik V.I. Earthquake safe technologies of underground mining of ore deposits. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 56-64. DOI: 10.46698/VNC.2025.55.34.005

Введение

Оптимизация проектов буровзрывных работ достигается за счет точности и надежности расчетов параметров взрыва, благодаря учету влияния участвующих факторов на результаты и безопасность работ и является перспективным резервом уменьшения негативного влияния на природную среду.

Научно-технические основы сейсмобезопасной технологии подземной разработки месторождений с учетом геодинамики массива сформулированы работами исследователей, в том числе [Ляшенко и др., 2006; Голик и др., 2019].

Характер и параметры влияния свойств массива на его сейсмическую активность исследованы в работах [Zaalishvili et al., 2016; Козырев и др., 2018; Козырев и др., 2021; Музаев и др., 2022; Заалишвили, Голик, 2024; Бурдзиева и др., 2024].

Распределение сейсмических событий в массиве горных пород и связь его с тектоническим строением при отработке удароопасных месторождений носит устойчивый характер [Котиков и др., 2020; Жукова и др., 2022].

Мониторинг геодинамических явлений микросейсмическим методом при освоении сейсмоопасных месторождений обеспечивается методами шахтной геофизики [Ляшенко, Кислый, 2015; Голик и др., 2023; Еременко и др., 2022; Январёв, Бобомуротов, 2024].

Результаты ретроспективного анализа показателей сейсмической опасности крупных сейсмических событий в подземных шахтах получены рядом ученых [Nordström et al., 2020; Wang et al., 2021; Chakraborty, Goswami, 2021].

Для безопасности горных объектов наибольшую опасность представляют вибрации породного массива при взрыве горных пород [McQuillan, Bar, 2023; Yin et al., 2021; Gonen, 2022; Разумов и др., 2022; Рукавишников и др., 2023; Фоменко и др., 2022; Беляков, Емельянов, 2023].

Материал и методы исследований

Обобщение, анализ, инженерное прогнозирование. Использованы результаты ранее выполненных исследований и публикации ГФИ ВНИЦ РАН и других специализированных организаций и материалы автора. Использованы методы корреляционного анализа и другие способы обработки информации.

Результаты исследований и их обсуждение

При разработке рудных месторождений, сложенных скальными породами относительные деформации в рудовмещающих породах должны подчиняться условию:

$$E_{\epsilon} \leq E_{\delta}.$$

где E_{δ} – допустимая деформация; E_{ϵ} – относительная деформация.
Скорость смещения пород при взрыве U_{ϵ} не должна превышать допустимую U_{δ} :

$$U_{\epsilon} \leq U_{\delta}$$

Параметры смещения пород и сооружений приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Допустимая скорость смещения для сооружений по классам /
Permissible displacement rate for structures by class

Наименование пород / The name of the breeds	Скорость продольных волн, м/с*10 ³ / Name Velocity of longitudinal waves, m/s*10 ³ rocks	Допустимая скорость смещения для сооружений, классы, см/с / Permissible displacement velocity for structures, classes, cm/s			
		1	2	3	4
Обломочные отложения / Block deposits	1–2	4.2	8.3	12.3	20.3
Скальные весьма трещиноватые/ The rocks are very fractured	3–4	9.6	19.2	28.4	47.7
Слабо трещиноватые / Slightly fractured	5–6	14.7	29.6	44.6	74.5
Монолитные без трещин /Monolithic without cracks	6–7	17.5	35.4	53.2	89.3

При производстве взрывов сейсмические сотрясения испытывают, и поверхностные, и подземные объекты. Скорость смещения земной поверхности является функцией массы заряда ВВ (Q):

$$U = 38,4 \left[\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right]^{1,12}, \text{ см/с.}$$

Стабилизирующую и ограничительную роль в управлении напряжениями играет феномен заполнения выработанного пространства твердеющими смесями (рис. 1).

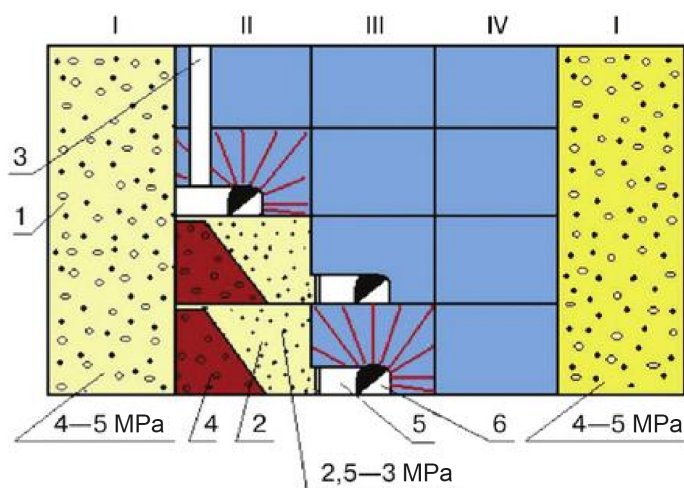


Рис. 1. Подэтажно-камерная система разработки с закладкой твердеющими смесями:
1 – прочность 4 МПа, 2 – прочность 3 МПа, 3 – отрезной восстающий, 4 – породный навал,
5 – погрузочный заезд, 6 – буро-доставочный орт /

Fig. 1. A sub-floor-chamber development system with a foundation of hardening mixtures:
1 – strength of 4 MPa, 2 – strength of 3 MPa, 3 – cut-off rising, 4 – rock bulk, 5 – loading run,
6 – drilling and delivery ort

Этому же способствует и рациональная направленность фронта взрывной волны при образовании экранирующей щели (рис. 2).

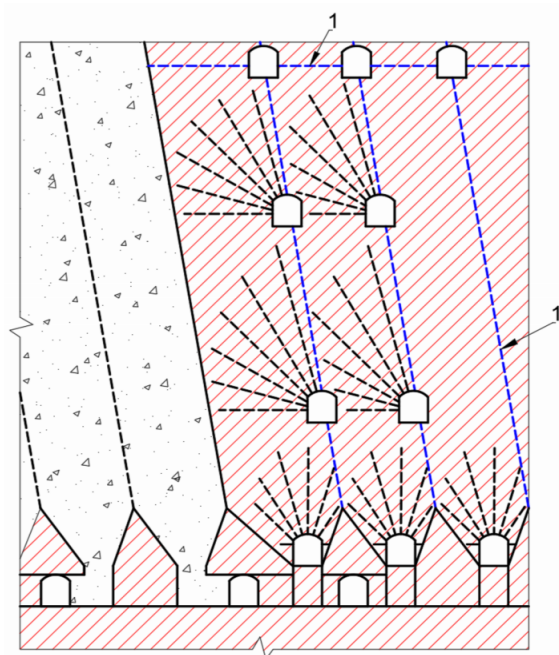


Рис. 2. Вариант системы разработки с наклоном стенок камер на закладочный массив:
1 – контурная экранирующая щель /

Fig. 2. Variant of the development system with chamber walls inclined to the backfill massif:
1 – contour shielding slot

Сейсмобезопасная масса заряда для объектов инфраструктуры:

$$Q = \left(\frac{U_d}{38,4} \right)^{2,68} \cdot R^3, \text{ кг.}$$

Сейсмобезопасная масса заряда для подземных сооружений:

$$Q = \left(\frac{U_d}{575} \right)^{1,44} \cdot R^3, \text{ кг.}$$

При расположении выработок параллельно вееру:

$$U = 575r^{2,08}, \text{ см / с}$$

При расположении выработок нормально к вееру:

$$U = 145r^{2,08}, \text{ см / с.}$$

Интенсивность сейсмических колебаний при прохождении взрывных волн через выработанное пространство уменьшается.

Изменение интенсивности сейсмических колебаний при взрывной отбойке происходит под воздействием технологических факторов, в том числе:

- в тылу взрыва заряда скорость возмущения массива в 1,5 раза больше, чем во флангах и в 2 раза, чем во фронтальной части;
- наличие отрезной щели снижает сейсмический эффект в 1,5 раза;
- при прохождении через выработанное пространство сейсмическое действие взрывной волны уменьшается в разы.

Критерием оценки опасности сейсмического действия взрыва является скорость смещения пород.

Уровень воздействия сейсмовзрывных колебаний устанавливается по скорости смещения U , которая формируется в среде при взрыве заряда Q на расстоянии r от сооружения (рис. 3).

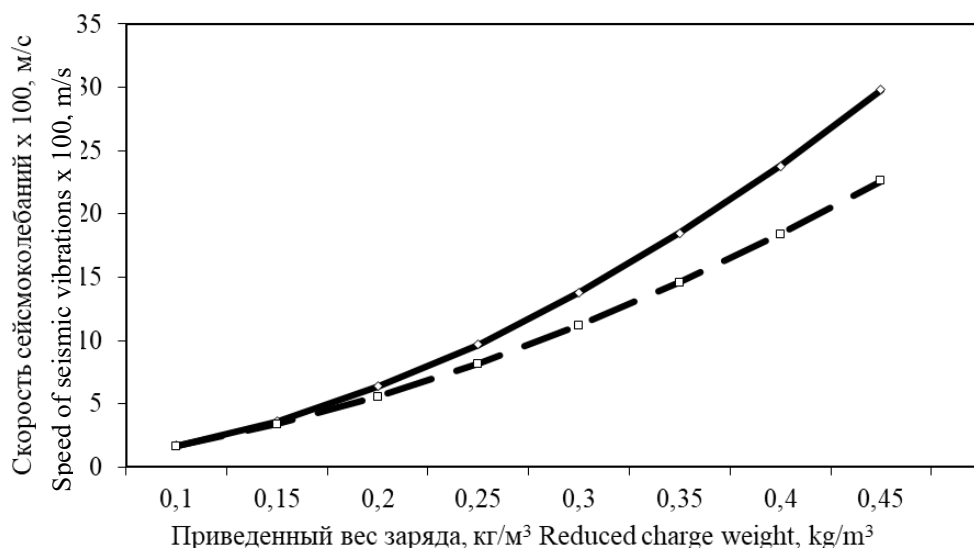


Рис. 3. Зависимость скорости сейсмоколебаний от приведенного веса заряда для условий:

1 – рудник 1; 2 – рудник 2 /

Fig. 3. Dependence of the seismic vibration velocity on the reduced charge weight for the conditions of:

1 – mine 1; 2 – mine 2

Интенсивность сейсмических колебаний во многом зависит от расположения охраняемых объектов относительно фронта взрывных работ, поэтому необходимо стремиться к удалению фронта горных работ от зданий и осуществлять мониторинг напряженно-деформированного состояния массива в основании зданий и сооружений (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Регламент и периодичность мониторинга /
Regulations and frequency of monitoring**

Регламент / Regulations	Содержание и задачи / Content and tasks	Мероприятия / Events	Периодичность / Periodicity
Диагностика пород / Breed diagnostics	Определение характера сдвижения пород, прогноз величин сдвижений и деформаций. Determination of the nature of rock displacement, prediction of the magnitude of displacements and deformations.	Оборудование подземных наблюдательных станций. / Equipment of underground observation stations.	Ежемесячно / Monthly
	Определение предельного состояния массива пород, профилактика критических деформаций. Determination of the limiting state of the rock mass, prevention of critical deformations.	Звукометрические и акустические наблюдения / Sonometric and acoustic observations	Ежемесячно / Monthly
	Контроль напряженно-деформированного состояния пород. Control of the stress-strain state of rocks.	Геофизические исследования / Geophysical research	Систематически / Systematically
Контроль состояния пород / Rock condition monitoring	Определение зон обрушения стенок выработок. Identification of areas of collapse of the walls of workings /	Визуальные наблюдения / Visual observations	Еженедельно / Weekly
	Уточнение формы отработок / Clarifying the form of workings	Инструментальные маршейдерские съемки / Instrumental surveying	При необходимости / If necessary
	Определение предельного состояния массивов пород и выработок / Determination of the limiting state of rock massifs and workings	Звукометрические наблюдения / Sonometric observations	Еженедельно / Weekly

Обеспечение безопасности горных работ во многом определяется эффективностью мер по снижению динамических форм проявления горного давления и методикой геофизического менеджмента горных работ.

Выводы

Сейсмовзрывные импульсы не должны превышать допустимые пределы: для зданий в хорошем состоянии – 3,0 см/с; в удовлетворительном – 2,0 см/с; в неудовлетворительном – 1,0 см/с.

При изменении фронта горных работ, введении в эксплуатацию новых блоков необходимо проведение контрольных замеров уровня сейсмозрывных сотрясений для уточнения условий распространения сейсмозрывных колебаний и корректирования существующих зависимостей определения сейсмобезопасной массы заряда и сейсмобезопасного интервала замедления с учетом горнотехнических условий производства горных работ.

Приведенные выше рекомендации могут быть использованы при выборе технологий выемки залежей руд с другим минералогическим составом.

Литература

1. Беляков Н.А., Емельянов И.А. Методика применения высокоточного массирования многокомпонентным датчиком одновременного преодоления. // Известия Уральского государственного горного университета. – 2023. – № 1(69). – С. 31–38. DOI 10.21440/2307-2091-2023-1-31-38.
2. Бурдзиева О.Г., Ревазов М.О., Кортиев А.Л., Гогичев Р.Р. Влияние воздействия геодинамических процессов на геоэкологическую нагрузку горного региона. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014
3. Голик В.И., Бурдзиева О.Г. К концепции разработки месторождений Садонского рудного пояса. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014.
4. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Дмитрак Ю.В., Габараев О.З. Повышение безопасности подземной добычи руд учетом геодинамики массива. // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 8. – С. 36–42. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-8-36-42.
5. 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.
6. Жукова С.А., Журавлева О.Г., Онуприенко В.С., Стрешнев А.А. Особенности сейсмического режима массива горных пород при отработке удароопасных месторождений Хибинского массива. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 7. – С. 5–17. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-7-0-5.
7. Козырев А.А., Батугин А.С., Жукова С.А. О влиянии обводненности массива на его сейсмическую активность при разработке апатитовых месторождений Хибин. // Горный журнал. – 2021. – № 1. – С. 31–36. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.06.
8. Козырев А.А., Семенова И.Э., Журавлева О.Г., Пантелеев А.В. Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике 09.01.2018. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 12. – С. 74–83. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83.
9. Котиков Д.А., Шабаров А.Н., Цирель С.В. Установление связи между распределением сейсмособытий в массиве горных пород и его тектоническим строением. // Горный журнал. – 2020. – № 1. – С. 28–32. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.05.
10. Ляшенко В.И., Кислый П.А. Обоснование сейсмобезопасных параметров взрывов при подземной разработке приповерхностных запасов месторождения под городской застройкой. // Известия вузов. Горный журнал. – 2015. – № 2. – С. 84–93.
11. Ляшенко В.И., Савельев Ю.Я., Ткаченко А.А. Научно-технические основы сейсмобезопасной технологии подземной разработке урановых месторождений. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 6. – С. 107–111.
12. Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И. Математическое моделирование сдвиговых сейсмических колебаний массива состоящего из рекультивированного материала отложения горно-рудной промышленности (хвосты). // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 2. – С. 19–33. DOI: 10.46698/VNC.2022.34.57.002.
13. Разумов Е.Е., Простов С.М., Мулев С.Н., Рукавишников Г.Д. Алгоритмы обработки сейсмической информации. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 2. – С. 17–29. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_17.
14. Рукавишников Г.Д., Мулев С.Н., Гаврилов А.Г. Опыт применения и перспективы развития системы сейсмического мониторинга GITS на Таштагольском железорудном месторождении. // Горная промышленность. – 2023. – № 1S. – С. 90–95.
15. Фоменко В.А., Соколов А.А., Лолаев А.Б., Аймбетова И.О. Некоторые результаты работ по оценке эманаций радона Унальского хвостохранилища. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. № 4(54). – С. 576–585. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-576-585.
16. Январев Г.С., Бобомуротов Б.Б. Объемная цифровая модель тектонической струк-

туры глубоких горизонтов Урупского медно-колчеданного месторождения (Северный Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 143–153. DOI: 10.46698/VNC.2024.76.38.011.

17. Chakraborty A., Goswami D. Three-dimensional (3D) slope stability analysis using stability charts. // International Journal of Geotechnical Engineering. – 2021. – Vol. 15. Issue 5. – pp. 642–649.

18. Eremenko A.A., Mulev S.N., Shtirts V.A. Microseismic monitoring of geodynamic phenomena in rockburst-hazardous mining conditions. // Journal of Mining Science. – 2022. – Vol. 58. No. 1. – pp. 10–19. DOI: 10.1134/s1062739122010021.

19. Gonen A. Investigation of fault effect on blast induced vibration. // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – Issue 5. – Art. No. 2278.

20. McQuillan A., Bar N. The necessity of 3D analysis for open-pit rock slope stability studies: Theory and practice. // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2023. – Vol. 123. No. 2. – pp. 63–69.

21. Nordström E., Dineva S., Nordlund E. Back analysis of short-term seismic hazard indicators of larger seismic events in deep underground mines (LKAB, Kiirunavaara Mine, Sweden). // Pure and Applied Geophysics. – 2020. – Vol. 177. – pp. 763–785.

22. Wang Y.-Q., Gong L.-J., An N.N., Peng X.-B., Wang W. et al. Field investigation of blasting-induced vibration in concrete linings during expansion of old highway tunnel. // Advances in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 2021. – Art. No. 8820544.

23. Yin T., Zhou C., Zheng C., Fu J., Guo Z. The vibration characteristics of ground of rock blasting in silt-rock strata. // Shock and Vibration. – 2021. – Vol. – 2021. – Art. No. 3318965.

24. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A.S., Dzeranov B.V., Shepelev V.D. Application of microseismic and calculational techniques in engineering-geological zonation. // International Journal of GEOMATE. – 2016. – Vol. 10. No. 1. – pp. 1670–1674. DOI: 10.21660/2016.19.5312.

References

1. Belyakov N.A., Emelyanov I.A. Technique for assessing the stress state of a rock mass by a multicomponent displacement sensor using the overcoring method. News of the Ural State Mining University. 2023. No. 1. Issue 69. pp. 31–38. DOI: 10.21440/2307-2091-2023-1-31-38. (In Russ.)

2. Burdzieva O.G., Revazov M.O., Kortiev A.L., Gogichev R.R. Influence of geodynamic processes on the geoecological 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.)

3. Golik V.I., Burdzieva O.G. Geophysical monitoring of Sadon field development technology. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014. (In Russ.)

4. Zhukova S.A., Zhuravleva O.G., Onuprienko V.S., Streshnev A.A. Seismic behavior of rock mass in mining rockburst-hazardous deposits in the Khibiny massif. Mining Information and Analytical Bulletin. 2022. No. 7. pp. 5–17. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_5. (In Russ.)

5. Zaalishvili 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.)

6. Kozyrev A.A., Batugin A.S., Zhukova S.A. Influence of water content on seismic activity of rocks mass in apatite mining in Khibiny. Mining Journal. 2021. No. 1. pp. 31–36. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.06. (In Russ.)

7. Kozyrev A.A., Semenova I.E., Zhuravleva O.G., Panteleev A.V. Hypothesis of strong seismic event origin in Rasvumchorr mine on January 9, 2018. Mining Information and Analytical Bulletin. 2018. No. 12. p. 74–83. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83. (In Russ.)

8. Kotikov D.A., Shabarov A.N., Tsirel S.V. Connecting seismic event distribution and tectonic structure of rock mass. Mining Journal. 2020. No. 1. pp. 28–32. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.05. (In Russ.)

9. Liashenko V.I., Kislyi P.A. Substantiation of seismic safety parameters of explosions in underground mining of the near-surface reserves of the field under urban development. *Minerals and Mining Engineering*. 2015. No. 2. pp. 84–93. (In Russ.)
10. Liashenko V.I., Savelyev Y.Ya., Tkachenko A.A. Scientific and technical foundations of seismic safe technology of underground development of uranium deposits. *Metallurgical and Mining Industry*. 2006. No. 6. pp. 107–111. (In Russ.)
11. Muzaev I.D., Harebov K.S., Muzaev N.I. Mathematical modeling of shear seismic vibrations of an array consisting of recultivated material deposits of the mining industry (tailings). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 19–33. DOI: 10.46698/VNC.2022.34.57.002. (In Russ.)
12. Razumov E.E., Prostov S.M., Mulev S.N., Rukavishnikov G.D. Seismic information processing algorithms. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2022. No. 2. pp. 17–29. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_17. (In Russ.)
13. Rukavishnikov G.D., Mulev S.N., Gavrilov A.G. Experience of application and prospects for the development of the GITS seismic monitoring system at the Tashtagolsky iron ore deposit. *Russian Mining Industry*. 2023. No. 1S. pp. 90–95. (In Russ.)
14. Fomenko V.A., Sokolov A.A., Lolaev A.B., Aimbetova I.O. Some results of the work on the evaluation of radon emanations at Unal tailings. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022. Vol. 14. No. 4. Issue 54. pp. 576–585. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-576-585. (In Russ.)
15. Yanvarev G.S., Bobomurotov B.B. A volumetric digital model of the tectonic structure of the deep horizons of the Urup copper-pyrite deposit (North Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 143–153. DOI: 10.46698/VNC.2024.76.38.011. (In Russ.)
16. Chakraborty A., Goswami D. Three-dimensional (3D) slope stability analysis using stability charts. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2021. Vol. 15. Issue 5. pp. 642–649.
17. Eremenko A.A., Mulev S.N., Shtirts V.A. Microseismic monitoring of geodynamic phenomena in rockburst-hazardous mining conditions. *Journal of Mining Science*. 2022. Vol. 58. No. 1. pp. 10–19. DOI: 10.1134/s1062739122010021.
18. Gonen A. Investigation of fault effect on blast induced vibration. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Issue 5. Art. No. 2278.
19. McQuillan A., Bar N. The necessity of 3D analysis for open-pit rock slope stability studies: Theory and practice. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2023. Vol. 123. No. 2. pp. 63–69.
20. Nordström E., Dineva S., Nordlund E. Back analysis of short-term seismic hazard indicators of larger seismic events in deep underground mines (LKAB, Kiirunavaara Mine, Sweden). *Pure and Applied Geophysics*. 2020. Vol. 177. pp. 763–785.
21. Wang Y.-Q., Gong L.-J., An N.N., Peng X.-B., Wang W. et al. Field investigation of blasting-induced vibration in concrete linings during expansion of old highway tunnel. *Advances in Civil Engineering*. 2021. Vol. 2021. Art. No. 8820544.
22. Yin T., Zhou C., Zheng C., Fu J., Guo Z. The vibration characteristics of ground of rock blasting in silt-rock strata. *Shock and Vibration*. 2021. Vol. 2021. Art. No. 3318965.
23. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A.S., Dzeranov B.V., Shepelev V.D. Application of microseismic and calculational techniques in engineering-geological zonation. *International Journal of GEOMATE*. 2016. Vol. 10. No. 1. pp. 1670–1674. DOI: 10.21660/2016.19.5312.

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2025.59.15.006

Оригинальная статья

Землетрясение 12.12.2020 г. с $M_w=4,8$ в очаговой зоне сильного Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. с $M_w=6,4$ на Восточном Кавказе

И.Ю. Дмитриева¹, И.П. Габсатарова², А.А. Саяпина¹,
С.С. Багаева¹, М.Я. Гайсумов³

¹ Северо-Осетинский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: sofgras@gmail.com;

² Единая геофизическая служба РАН, Россия, 249035, г. Обнинск, пр. Ленина, 189, e-mail: frc@gsras.ru;

³ Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Россия, 364051, г. Грозный, ул. В. Алиева, 21а, e-mail: gro_ss@bk.ru

Статья поступила: 11.10.2024, доработана: 27.01.2025, принята к публикации: 31.01.2025

Резюме: Актуальность работы. В статье рассматривается ощутимое землетрясение с магнитудой $M_w=4,8$, произошедшее 12 декабря 2020 г. в 21^h29^m по Гринвичу на территории Чечни. Очаговая область основного толчка и последующих афтершоков расположена в районе сочленения южного борта Терско-Каспийского передового прогиба со структурами северного склона Большого Кавказа и связана с Черногорской зоной ВОЗ ($M_{\max}=6,5$) Терско-Сунженской сейсмогенерирующей области. Исследование подобных землетрясений представляет интерес для понимания происходящих тектонических процессов. Полученные материалы могут быть использованы при исследовании сейсмической опасности Чеченской Республики и сопредельных территорий. **Цель исследования.** Целью публикации является комплексный анализ полученных сведений об ощутимом землетрясении 12 декабря 2020 г., включающий в себя параметры гипоцентра, афтершоковый процесс, механизм очага, спектральные параметры и макросейсмические исследования о проявлении основного толчка и афтершоков. **Методы.** Для первичной станционной обработки цифровых записей применялась методика, реализованная в программно-вычислительном комплексе WSG. Для определения параметров гипоцентров землетрясений использована программа hypo71 с заданной скоростной моделью для исследуемого района. Для уточнения параметров афтершоков дополнительно применен метод «двойных разностей». Механизм очага землетрясения рассчитан по знакам первых вступлений продольных волн. Спектральные исследования проведены с помощью программы SEISAN. **Результаты.** Вычислены и проанализированы параметры землетрясения. Определен тип механизма очага землетрясения – «взброс». Приведены исторические сведения и дана сравнительная оценка проявления сейсмичности с другим сильным Черногорским землетрясением 1976 года. Исследованы форшоковый и афтершоковый процессы с привлечением современных методов обработки сейсмических событий. Описана геолого-геофизическая привязка эпицентральной зоны события. Проведено сравнение механизмов очагов основного толчка и отдельных афтершоков. Получены значения спектральной плотности, сейсмического момента и моментной магнитуды землетрясения. На основе собранных макросейсмических сведений о проявлении землетрясения построена карта пунктов-баллов и изосейст равной балльности.

Ключевые слова: Северный Кавказ, землетрясение, макросейсмические и инструментальные данные, механизм очага, афтершок.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00682-24) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке

«Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Для цитирования: Дмитриева И.Ю., Габсатарова И.П., Саяпина А.А., Багаева С.С., Гайсумов М.Я. Землетрясение 12.12.2020 г. с $M_w=4,8$ в очаговой зоне сильного Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. с $M_w=6,4$ на Восточном Кавказе. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 65-81. DOI: 10.46698/VNC.2025.59.15.006

GEOPHYSICS

DOI: 10.46698/VNC.2025.59.15.006

Original paper

Earthquake on 12.12.2020 with $M_w=4.8$ in the focal zone of the strong Chernogorsky earthquake on 07.28.1976 with $M_w=6.4$ in the Eastern Caucasus

I.Yu. Dmitrieva¹, I.P. Gabsatarova², A.A. Sayapina¹,
S.S. Bagaeva¹, M.Ya. Gaisumov³

¹ North Ossetian branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation,
e-mail: sofgsras@gmail.com;

² Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 189 Lenin Ave., Obninsk 249035,
Russian Federation, e-mail: frc@gsras.ru;

³ Kh.I. Ibragimov Complex Institute, Russian Academy of Sciences, 21a V. Alieva Str., Grozny
364051, Russian Federation, e-mail: gro_ss@bk.ru

Received: 11.10.2024, revised: 27.01.2025, accepted: 31.01.2025

Abstract: Relevance. The article discusses a significant earthquake that occurred on 12.12.2020 at 21:29 GMT in the Chechen Republic with a magnitude of $M_w = 4.8$. The epicenter of this earthquake and subsequent aftershocks is located in the junction between the southern part of the Tersko-Caspian trough and the structures of the northern slopes of the Greater Caucasus. This area is associated with the Chernogorsky earthquake sources occurrence zone, which has a maximum magnitude of 6.5 and is a seismic generating region in the Tersky-Sunzha area. Studying such earthquakes is essential for understanding ongoing tectonic processes and can provide valuable data for assessing seismic hazards in the Chechnya region and its surrounding areas. **Aim.** The purpose of this publication is a comprehensive analysis of the information received about the significant earthquake on 12.12.2020, including the parameters of the hypocenter, the aftershock process, the source mechanism, spectral parameters and macroseismic studies on the manifestation of the main shock and aftershocks. **Methods.** For the primary processing of digital records, a standard technique implemented in the software computing complex WSG was used. The hypo71 program with a given velocity model for the studied area was used to determine the parameters of earthquake hypocenters. To clarify the parameters of aftershocks, the “double differences” method was additionally applied. The mechanism of the earthquake origin was calculated based on the characteristics of the first arrivals of the primary waves. Spectral analysis was performed using the SEISAN software. **The results** were processed and analyzed, leading to the determination of the type of seismic source mechanism as “reverse fault”. Historical information was provided, as well as a comparison of seismic activity in Chernogorsky and another significant earthquake that occurred in 1976. Foreshock and aftershocks processes were studied using modern methods for processing seismic data. The geological and geophysical characteristics of the epicentral region were described. The mechanisms of the main shock source and individual aftershocks were compared.

The values of the spectral density, seismic moment and moment magnitude of the earthquake were obtained. Based on macroseismic data collected about the earthquake, a map of equal-magnitude points and isoseisms was constructed.

Keywords: North Caucasus, earthquake, macroseismic and instrumental data, source mechanism, aftershocks.

Acknowledgement: *The work was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. The data used in the work were obtained with large-scale research facilities "Seismic infrasound array for monitoring Arctic cryolitozone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, neighbouring territories and the world".*

For citation: Dmitrieva I.Yu., Gabsatarova I.P., Sayapina A.A., Bagaeva S.S., Gaisumov M.Ya. Earthquake on 12.12.2020 with $M_w=4.8$ in the focal zone of the strong Chernogorsky earthquake on 07.28.1976 with $M_w=6.4$ in the Eastern Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 65-81. DOI: 10.46698/VNC.2025.59.15.006

Введение

12 декабря 2020 г. в 21^h29^m по Гринвичу на территории Урус-Мартановского района Чеченской Республики произошло ощутимое 5–6-балльное землетрясение с $K_p=12,9$. Его эпицентр локализован в районе сочленения южного борта Терско-Каспийского передового прогиба со структурами северного склона Большого Кавказа и связан с Черногорской зоной ВОЗ ($M_{\max}=6,5$) Терско-Сунженской сейсмогенерирующей области [Несмеянов и др., 1996]. Здесь происходит пересечение тектонических структур кавказского и диагонального простирания. Известно, что Терско-Сунженская сейсмогенерирующая область высокосейсмична. Положение эпицентров наиболее сильных исторических и современных землетрясений показано на рисунке 1.

Проявление возросшей сейсмической активности в 2020 г. произошло вблизи очаговой зоны 8–9-балльного Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. с $M_w=6,4$, которое входит в десятку сильнейших на Северном Кавказе в XX–XXI веках. Материалы, содержащие инструментальную и макросейсмическую информацию о Черногорском землетрясении 1976 г., описаны в статьях дагестанских сейсмологов [Асманов и др., 1979; Левкович, Амиров, 2010] и геологов [Борисов, Рейснер, 1977]. В названных статьях отмечалось, что землетрясение 28.07.1976 г. сопровождалось небольшим числом сильных афтершоков, что при довольно высоком значении магнитуды $M_w=6.4$ по данным сейсмологического бюллетеня агентства MOS (URL: http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/1976), характеризовало «вялый» афтершоковый процесс, но с распространенным полем афтершоков (до 100 км от эпицентра). Современный взгляд на сохранившиеся данные по этому землетрясению, позволяет скорее говорить о неудовлетворительной точности определения параметров более слабых землетрясений, да и варианты положения эпицентра основного толчка по данным разных служб значительно расходятся. Сложно доверять и значениям глубин $h=20$ км для основного толчка и $h=10$ –20 км для афтершоков, так как эти значения определялись по определенному набору годографов (5, 10 и 15 и 20 км), а ближайшая станция Грозный находилась примерно в 50 км от эпицентра и зарегистрировала далеко не все события; более удаленные станции региональной сети были расположены на расстояниях свыше 100 км. В бюллетене ISC сообщается глубина, определенная по глубинным фазам « $pP_DEPTH=16\pm1$ км», что близко и к глубинам основного толчка и афтершоков исследуемого землетрясения 2020 года.

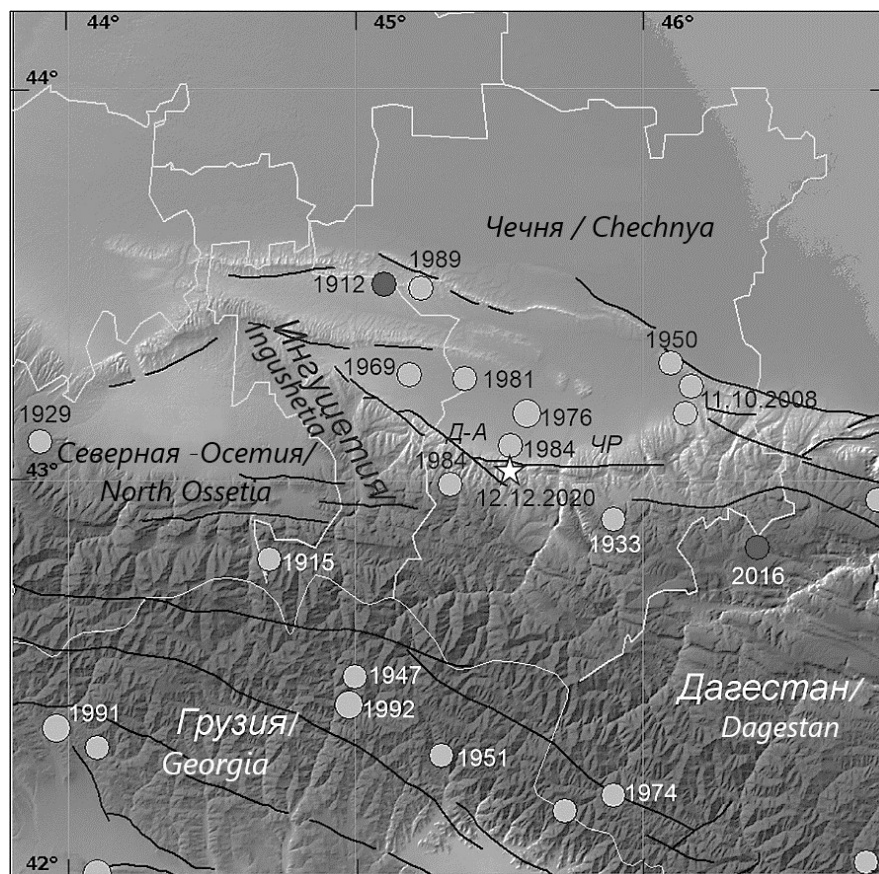


Рис. 1. Карта эпицентров сильнейших землетрясений с $M \geq 4,5$ центральной части Терско-Каспийского прогиба за период с 1900 г. по 2020 г. /

Fig. 1. Map of the epicenters of the strongest earthquakes with $M \geq 4,5$ in the central part of the Tersk-Caspian trough for the period from 1900 to 2020

Известно, что активизация в исследуемой зоне продолжилась в 2021 г.: 20 октября здесь произошло еще одно ощутимое землетрясение с $M_w=4,6$, с интенсивностью 5 баллов в населенных пунктах Алхан-юрт и Гойты, 4–5 баллов – в населенных пунктах: Урус-Мартан (восточная окраина), Алхан-кала, Октябрьское, пос. Черноречье (зап. окраина г. Грозного), Алхазурово, Гой-чу.

Цель работы

Целью настоящих исследований является комплексный анализ полученных сведений о землетрясении 12 декабря 2020 г., включающий в себя параметры гипоцентра, афтершоковый процесс, механизм очага, спектральные параметры и макросейсмические сведения о проявлении основного толчка и афтершоков. Полученные материалы могут быть использованы при исследовании сейсмической опасности Чеченской Республики и сопредельных территорий.

Методы и результаты исследования

Методика исследований землетрясения 12 декабря 2020 года включала: оценку и обработку инструментальных данных, расчет и графическое представление механизма очага, сбор и анализ макросейсмических данных, обзор исторической и современной сейсмичности.

Инструментальные данные и методика обработки. Параметры гипоцентра исследуемого землетрясения были определены по данным сетей сейсмических станций региональных сейсмологических центров: Северо-Осетинского (NOGSR сеть N0) и Дагестанского (DAGSR сеть DA) филиалов, а также Центрального отделения (ЦО) ФИЦ ЕГС РАН (OBGSR сеть RU). В 2020 г. сейсмическая сеть на Северном Кавказе состояла из 63 сейсмических станций. Все станции оснащены цифровым оборудованием и передают информацию в центры обработки в режиме, близком к реальному времени. Непосредственно на территории Чеченской Республики установлено всего две станции: «Грозный» (GROC) – в 15 км к юго-востоку от Грозного в п. Чечен-Аул и «Ведено» (DVE) в п. Дышне-Ведено. Однако, на соседних территориях Дагестана и Республики Северная Осетия-Алания развернуты сети из 16 и 12 станций соответственно, что позволяет обеспечивать представительность землетрясений на территории Чеченской Республики с $K_{pmin}=6,5$ и выше.

Для определения основных параметров главного толчка и его афтершоков использовалась стандартная методика станционной обработки цифровых записей, реализованная в программно-вычислительном комплексе WSG (Акимов А.П., Красилов С.А. Программный комплекс WSG «Система обработки сейсмических данных». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664678 от 16.11.2020 г.). Локализация с получением параметров гипоцентров производилась по программе hуpо71 [Lee, Lahr, 1975] с заданной скоростной моделью для исследуемого района [Краснопевцева, 1984].

Параметры землетрясения 12 декабря 2020 г., полученные в различных сейсмологических центрах, приведены в таблице 1. Как видно, имеются расхождения в инструментальных определениях координат эпицентра по разным источникам, не превышающие $0,2^\circ$ по широте и долготе и 10 км – по глубине. Значения параметров регионального центра СОФ ФИЦ ЕГС РАН (NOGSR) близки к значениям ЦО ФИЦ ЕГС РАН (OBGSR), которые признаны наиболее приемлемыми, в связи с наибольшим количеством станций, участвующих в обработке.

Таблица 1 / Table 1

Основные параметры землетрясения 12 декабря 2020 г. с $K_p=12,9$, $M_w=4,8$ по данным различных агентств / The main parameters of the earthquake on December 12, 2020 with $K_p=12,9$, $M_w=4,8$ according to various agencies

Агентство/ The Agency	t_0 ч:мин:с/ h:min:s	Гипоцентр/ Hypocenter			Класс и магнитуда/ Class and magnitude	Источник/ A source
		φ° , N	λ° , E	h , км		
NOGSR	21:29: 49	43.02	45.56	17	$K_p=12.4$	
OBGSR	21:29:48.6	43.04	45.54	19.7	$K_p=12.9$, $M_w=4.8$	
TIF	21:29:48.3	43.146	45.434	11.3	$ML=5$	(https://doi.org/10.31905/D808B830)
USGS (NEIC)	21:29:48	43.155	45.529	10	$mb=4.7$	(https://doi.org/10.31905/D808B830)
EMSC	21:29:51	43.23	45.67	20	$mb=4.7$	(https://doi.org/10.31905/D808B830)
GCMT	21:29:49.9	43.16	45.40	12.6	$M_w=4.8$	(https://doi.org/10.31905/D808B830)

Агентство/ The Agency	t_0 ч:мин:с/ h:min:s	Гипоцентр/ Hypocenter			Класс и магнитуда/ Class and magnitude	Источник/ A source
		φ° , N	λ° , E	h , км		
IDC	21:29:46.79	43.04	45.47	0.0f	$mb=4.2$, $ML=4.1$, $Ms=4.0$	(https://doi.org/10.31905/D808B830)
ISC	21:29:49.04	43.111	45.536	13.4 $h_{sP}=14.0\pm 3.5$	$mb=4.5$, $Ms=4.1$	(https://doi.org/10.31905/D808B830)

Примечания: NOGSR – информационно-обрабатывающий центр Северо-Осетинского филиала ФИЦ ЕГС РАН; OBGSR (код MOS в ISC (<https://doi.org/10.31905/D808B830>)) – сеть и обрабатывающий центр ЦО ФИЦ ЕГС РАН, где составляется региональный бюллетень Северного Кавказа; TIF – Институт наук о Земле Национального центра сейсмического мониторинга, Грузия; IDC – International Data Centre, Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBTO), Austria; EMSC – European-Mediterranean Seismological Centre; NEIC – National Earthquake Information Center, USA; ISC – International Seismological Center, UK; GCMT – Lamont Doherty Earth Observatory, USA; f – фиксированная глубина.

Notes: NOGSR – information processing center North Ossetia (Alania) Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences; OBGSR (code MOS в ISC (<https://doi.org/10.31905/D808B830>)) – network and processing center Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences; TIF – Institute of Earth Sciences/ National Seismic Monitoring Center, Georgia; IDC – International Data Centre, Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBTO), Austria; EMSC – European-Mediterranean Seismological Centre; NEIC – National Earthquake Information Center, USA; ISC – International Seismological Center, UK; GCMT – Lamont Doherty Earth Observatory, USA; f – fixed depth.

Форшоки и афтершоки. Почти за полчаса до основного толчка в его очаговой зоне зарегистрирован слабый форшок 12 декабря в 20^h53^m с $K_p=6,7$ с координатами эпицентра $\varphi=42,98^\circ\text{N}$, $\lambda=45,53^\circ\text{E}$ и глубиной $h=16$ км.

После главного толчка последовала серия афтершоков.

Для уточнения параметров афтершоков дополнительно применен метод «двойных разностей» [Waldhauser, Ellsworth, 2000; Waldhauser, 2001]. Он базируется на том факте, что, если для одной станции различие между гипоцентрными расстояниями от двух землетрясений мало, по сравнению с самим гипоцентрным расстоянием и размерами скоростной неоднородности, то пути луча между исходной областью и общей станцией подобны вдоль почти всего пути луча. Уточнение положения гипоцентра основывается на вычислении взаимной корреляции пар временных отклонений для всех возможных пар событий.

Метод «двойных разностей» эффективен при уточнении положения гипоцентров в случае совокупности близко расположенных очагов (например, афтершоков) и позволяет одновременно переопределять местоположения большого числа гипоцентров землетрясений на относительно больших удалениях от наблюдающих станций, объединяя разности времен пробега P - и S -волн, полученные из кросскорреляционного анализа, с разностями времен пробега, полученными из каталога. Минимизируя остаточные разности (или двойные разности) для пар землетрясений, можно минимизировать и векторную разницу между положениями их гипоцентров. Таким образом, можно уточнить расстояние между событиями без использования станционных поправок, т.е. удастся избавиться от влияния неоднородностей среды на пути очаг–станция, которые, как правило, недостаточно хорошо могут быть учтены.

На Северном Кавказе метод «двойных разностей» был успешно применен для уточнения координат гипоцентров землетрясений в центральной части Терско-Каспийского прогиба и позволил уменьшить разброс эпицентров афтершоков Курчалойского землетрясения 11 октября 2008 года [Габсатарова, 2014].

Для землетрясения 12 декабря 2020 г. уточнение методом «двойных разностей» проводилось по выборке из 563 событий с декабря 2020 г. по апрель 2021 г. с $M \geq 2,0$ в рамках $42,5\text{--}44,5^\circ\text{N}$ и $43,5\text{--}47,5^\circ\text{E}$. Эти землетрясения были зарегистрированы в целом 77 станциями. На записях этих станций для названного числа событий были выделены по 26759 фаз P -волн и S -волн. Установлено, что связанных пар оказалось 1728, в среднем по 18 связей для пары событий, среднее расстояние между связанными событиями 3,25 км, максимальное отклонение между связанными событиями 10 км.

Было кластеризовано 414 событий, из них первый кластер объединил 200 событий. Именно к этому кластеру было отнесено главное землетрясение и его основные афтершоки. Центроид кластера имел координаты $42,99^\circ\text{N}$ и $45,56^\circ\text{E}$, $h=14,74$ км. Положение основного толчка и афтершоков показано на рисунке 2. Можно заключить, что землетрясение реализовалось в компактной области ($42,98\text{--}43,06^\circ\text{N}$; $45,5\text{--}45,6^\circ\text{E}$), в тектоническом плане, согласно [Несмеянов и др., 1996] в месте пересечения диагональной Даттых–Ахловской погребенной шовно-сдвиговой зоны и Черногорского глубинного разлома. Глубины основного толчка и афтершоков в среднем составили $15 \text{ км} \pm 4$ км. Ошибки вычисления оценены как: $1,5 \pm 0,5$ км по широте, $1,8 \pm 0,6$ км по долготе и $2,3 \pm 1$ км по глубине.

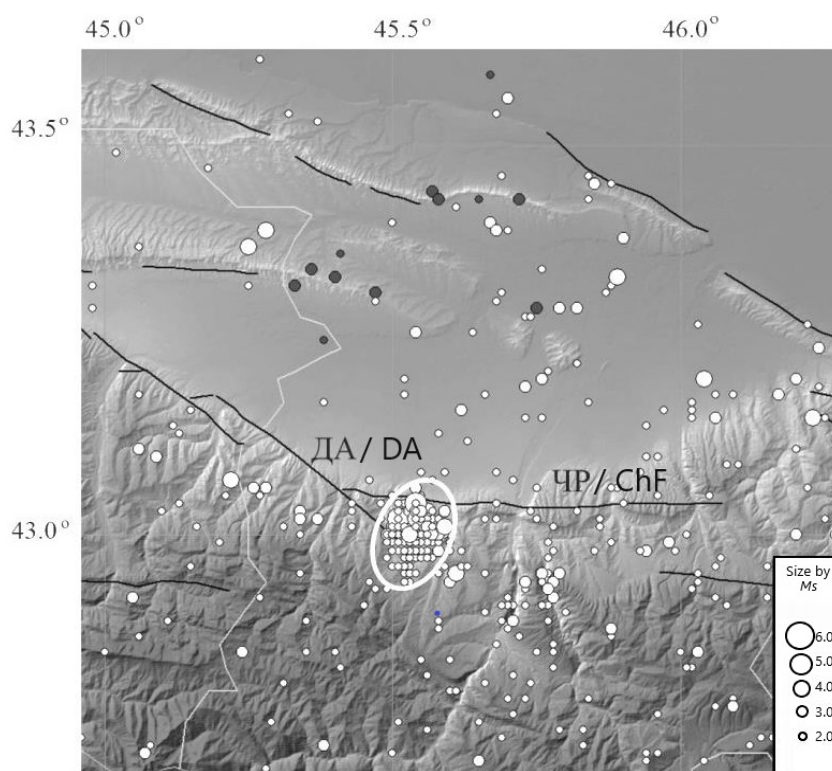


Рис. 2. Положение эпицентров землетрясений 2020 г. в эпицентральной области землетрясения 12 декабря и ее окружении на фоне основных глубинных разломов по [Трифонов и др., 2002]: ДА – Даттых–Ахловская погребенная шовно-сдвиговая зона; ЧР – Черногорский разлом (или Владикавказская флексурно-разрывная зона); белым эллипсом отмечена афтершоковая область, выделенная по методу Прозорова [Прозоров, 1986] /

Fig. 2. The position of the epicenters of the 2020 earthquake in the epicentral region of the December 12 earthquake and its surroundings against the background of the main deep faults according to [Trifonov et al., 2002]: DA – Datty–Akhlovskaya buried suture-shear zone; ChF – Chernogorsky fault (or Vladikavkaz flexure-rupture zone); a white ellipse marks the aftershock area, highlighted by the Prozorov method [Prozorov, 1986]

Афтершоковая область по методу Прозорова [Прозоров, 1986], реализованному в программе EEDB [Михеева и др., 2013], может быть описана эллипсом с размерами: большая ось равна 20 км, малая ось – 15 км. Инструментальный очаг смещен к северу от центра эллипса примерно на 4 км. Эллипс слабо вытянут и явно не приурочен к какому-то глубинному разлому.

График распределения афтершоков во времени и по энергетическому классу изображен на рисунке 3, из которого хорошо видно, что большинство афтершоков произошло в первые сутки после главного толчка, а наиболее сильные афтершоки реализовались в первые 11 дней. Сильнейший афтершок реализовался через 13 часов после основного толчка 13 декабря в $11^{\text{h}}34^{\text{m}}$ с $K_p=12,3$. Величина энергетической ступени между ними составила $\Delta K_{\text{афт}}=12,9-12,3=0,6$. Таким образом, землетрясение характеризуется быстрым спадом афтершоковой активности, что возможно связано с его относительно невысокой энергией.

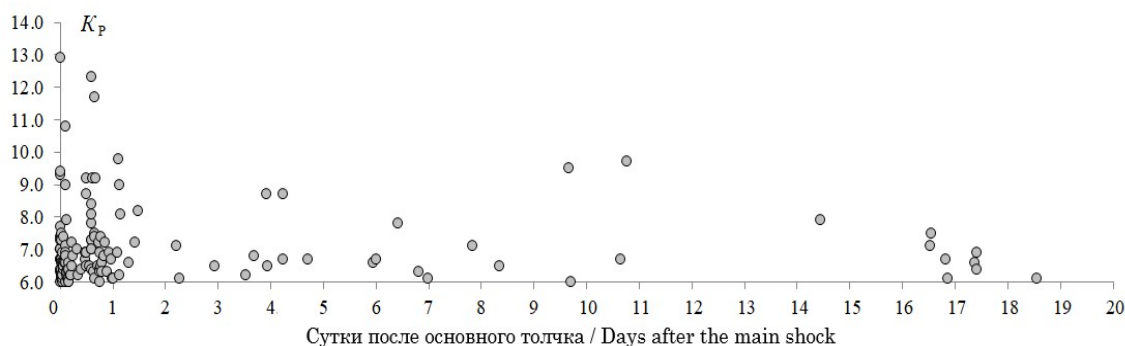


Рис. 3. Распределение во времени от основного толчка афтершоков землетрясения 12.12.2020 г. с представительного уровня $K_p=6,0$ за период с 12 декабря 2020 г. по 31 декабря 2020 г. /

Fig. 3. Time distribution from the main shock of the earthquake aftershocks on 12.12.2020 from a representative level of $K_p=6,0$ for the period from December 12, 2020 to December 31, 2020

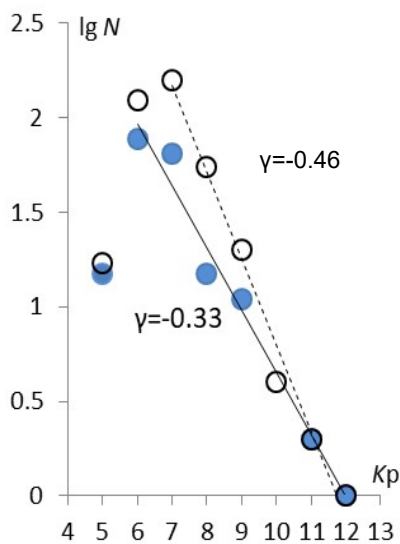


Рис. 4. График повторяемости афтершоков землетрясения 12 декабря 2020 г. (сплошная линия) в сравнении с графиком за предыдущий период с января по ноябрь 2020 г. (пунктирная линия) /

Fig. 4. The recurrence chart of the earthquake aftershocks on December 12, 2020 (solid line) compared with the chart for the preceding period from January to November 2020 (dotted line)

Уравнение графика повторяемости для афтершоков (рис. 4), рассчитанное для его линейной части, имеет вид: $\lg N=3,94-0,33K_p$. Наклон графика, равный $\gamma=-0,33$, ниже значения $\gamma=-0,46$, рассчитанного для этого региона в 2020 г.

Механизм очага землетрясения 12 декабря 2020 г. рассчитан в программе FA (Ландер А.В. Программа расчёта и графического представления механизмов очагов землетрясений по знакам первых вступлений P -волн (FA). Свидетельство о государ-

ственной регистрации программы для ЭВМ № 2018662004 от 25 сентября 2018 г.) по знакам первых вступлений продольных волн на 40 региональных станциях, расположенных на расстояниях от 28 до 326 км от эпицентра, из них на 15 станциях зарегистрированы волны сжатия, на 25 – волны растяжения. Землетрясение возникло под преобладающим действием близгоризонтальных сжимающих напряжений, ориентированных на юг-юго-восток (табл. 2). Одна из нодальных плоскостей *NP1* имеет север-северо-восточное простирание, другая плоскость *NP2* – запад-юго-западное простирание. Тип движения по обеим плоскостям – взброс.

Таблица 2 / Table 2

**Параметры механизма очага землетрясения 12 декабря 2020 года
по данным разных источников /
Parameters of the mechanism of the earthquake on December 12, 2020
according to various sources**

Дата/ Date δ м/ d m	t_0 , ч:мин:с/ h:min:s	h , км/ km	K_p	Оси главных напряжений/ Principal axes						Нодальные плоскости/ Nodal planes						Диаграмма/ Chart	Источник/ A source
				T		P		N		$NP1$			$NP2$				
				PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$		
12.12	21:29:49	10	12.4	81	325	9	156	2	66	65	54	88	248	36	93		NOGSR
12.12	21:29:48.6	10	12.9	84	252	0	162	6	72	66	45	82	257	45	98		OBGSR
12.12	21:29:49.9			68	130	16	353	14	259	104	31	118	252	63	74		GCMT

В таблице 2 приведены также решения механизма очага, рассчитанные в GCMT и в ЦО ФИЦ ЕГС РАН (OBGSR). Региональное решение близко к решению, полученному в ЦО ФИЦ ЕГС РАН. Как видно из диаграммы по данным GCMT в очаге также произошел взброс, но с незначительной сдвиговой компонентой смещения. Несмотря на небольшие различия в приведенных решениях, можно предположить, что в очаге землетрясения произошел взброс активного блока земной коры под действием горизонтальных сжимающих напряжений.

Для девяти афтершоков с $K_p \geq 9$ также были получены решения фокальных механизмов (табл. 3), которые показали подобный тип подвижки в очаге. Установлено, что движение в очагах землетрясений произошло под действием сил сжатия, направленных субмеридионально, тип движения в очаге взброс, у афтершоков иногда с небольшими сдвиговыми компонентами, простирание нодальных плоскостей субширотно.

Взбросовый тип движения в очагах характерен для структур Большого Кавказа, а простирание обеих нодальных плоскостей механизма очага землетрясения близко к субширотной ориентации Черногогорского разлома.

Таблица 3/ Table 3

**Параметры механизмов очагов афтершоков землетрясения 12.12.2020 г. /
Parameters of mechanisms of earthquake aftershock on 12.12.2020**

Дата/ Date	t_0 , ч:мин:с/ h:min:s	h , км/ km	K_p	Оси главных напряжений/ Principal axes						Нодальные плоскости/ Nodal planes						Диаграмма/ Chart
				T		N		P		$NP1$			$NP2$			
				PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$	
12.12.2020	23:50:20	11	10.8	75	281	12	63	9	155	55	55	76	259	38	109	
13.12.2020	11:34:18	10	12.3	81	325	2	66	9	156	65	54	88	248	36	93	
13.12.2020	12:08:26	20	9.2	62	176	9	282	26	17	280	72	81	127	20	116	
13.12.2020	13:05:01	21	11.7	78	33	9	257	8	166	84	54	101	246	37	76	
13.12.2020	13:36:42	19	9.2	79	90	11	270	0	180	101	46	105	259	46	75	
14.12.2020	00:37:16	20	9.0	76	229	11	90	9	358	278	55	103	75	37	72	
14.12.2020	00:12:59	16	9.8	84	69	6	252	0	161	246	45	82	77	45	98	
22.12.2020	13:21:02	20	9.5	39	80	36	207	30	322	106	37	171	203	85	54	
23.12.2020	16:01:11	11	9.7	59	115	30	278	7	13	258	59	54	132	46	134	

Сравнение механизма очага землетрясения 12 декабря 2020 г. с механизмом очага 8–9-балльного Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. (табл. 4) показало подобие в типе движения – взброс. Ориентация же нодальных плоскостей этого механизма ближе к ориентации диагональной Даттых-Ахловской разломной зоны.

Таблица 4 / Table 4

**Параметры механизма очага Черногорского землетрясения 1976 г. /
Parameters of the mechanism of the hearth of the Montenegrin earthquake of 1976**

Дата/ Date	t_0	h , км/ km	M	Оси главных напряжений/ Principal axes						Нодальные плоскости/ Nodal planes						Диаграмма/ Chart	Источник/ A source
				T		N		P		$NP1$			$NP2$				
				PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$		
28.07.1976	20:17	15	6.4	60	196	0	286	30	16	286	75	90	107	15	91		GCMT

Спектральные параметры основного толчка. В ЦО ФИЦ ЕГС РАН для спектральных исследований в настоящее время применяется программа SEISAN [Havskov, Ottemoller, 2010], одним из элементов которой является построение спектров сейсмических фаз [Brune, 1970], вычисление сейсмического момента и магнитуды Канамори [Hanks, Kanamori, 1979]. Предварительно с помощью программы CODAQ [Havskov et al., 1989], входящей в этот же комплекс, проведены работы по расчету добротности среды в литосфере восточной части Северного Кавказа, включающей Терско-Каспийский (ТК) прогиб и структуры Дагестанского клина, по методу огибающей коды-волн для поперечных S -волн. В [Зверева и др., 2024а] получена средняя зависимость добротности Q_c от частоты, которая определена как

$$Q_c = 94 \cdot f^{0.95} \quad (1)$$

Основываясь на этой формуле (1), были вычислены значения сейсмического момента и магнитуды Канамори для основного толчка 12 декабря 2020 г. в 21^h29^m и 5 афтершоков (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

Спектральные очаговые параметры для основного толчка и афтершоков землетрясения 12 декабря 2020 г. по данным [Зверева и др., 2024б] /
Spectral focal parameters for the main shock and aftershocks of the earthquake on December 12, 2020 according to [Zvereva et al., 2024b]

№	Дата и время/ Date and time	K_p	$M_0 \cdot 10^{15}$ (Н·м)	M_w	N_{sta}
0	12.12 21:29	12.9	15.85	4.7	19
1	12.12 23:50	10.8	1.26	4.0	24
2	13.12 11:34	12.3	6.31	4.5	17
3	14.12 00:12	9.8	0.20	3.5	18
4	22.12 13:21	9.5	0.16	3.4	9
5	23.12 16:01	9.7	0.13	3.3	8

Для сравнения приведем значения M_0 и M_w по данным 101 телесейсмической станции, полученные в GCMT и представленные в ISC (International Seismological Centre. (2024). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>) для основного толчка: $M_0=2,253E+16$; $M_w=4,8$. Как видно, расхождения незначительные.

Макросейсмические данные. М.Я. Гайсумовым был осуществлен выезд в эпицентральную зону для сбора сведений о сотрясениях в населенных пунктах Чеченской Республики. Сотрудниками центра NOGSR был произведен сбор макросейсмических данных на территориях Осетии, Ингушетии и Кабардино-Балкарии. Сведения о макросейсмических проявлениях в 27 населенных пунктах собраны путем телефонного опроса с последующим составлением опросных листов. Оценка интенсивности проводилась по реакции людей и предметов быта на основе шкалы MSK-64 [Медведев и др., 1965].

С интенсивностью 5–6 баллов землетрясение проявилось в населенных пунктах Рошни-Чу, Танги-Чу, Мартан-Чу, Гехи, Урус-Мартан. Оно было замечено практически всеми жителями этих сел. Большинство населения испытывали сильный испуг, головокружение и в панике покидали помещения. В домах сильно раскачивались висевшие предметы, дребезжала посуда и стекла в окнах, скрипела и дрожала мебель, предметы двигались, беспокоились домашние животные. Находящиеся в автомашинах испытывали покачивания. Очевидцам трудно было стоять на ногах. Предположительно ощущалось от 1 до 3 толчков в течение 3–4 секунд. Зафиксированы отдельные случаи образования волосных трещин в штукатурке. В с. Рошни-Чу в частном одноэтажном кирпичном доме образовалась (по всей видимости, расширилась до 1–2 см) трещина в кирпичной кладке и фундаменте. В отдельных случаях треснули стекла в пластиковых окнах. При землетрясении был слышен грохотообразный гул, похожий на звук от далекого взрыва.

Интенсивность колебаний 5 баллов была зафиксирована в населенных пунктах Ассиновская, Шалажи, Валерик, Гой-Чу, Катар-Юрт, Ачхой-Мартан, Гойты, Алхан-Кала, Алхан-Юрт, Закан-Юрт, Чечен-Аул, Гикало, Грозный-юг (южная окраина). Здесь землетрясение ощутили многие люди, находящиеся в движении и почти все в покое (кровати шатались). В помещениях дрожала и скрипела мебель, открывались дверцы шкафов, колебались свободно подвешенные часы, люстры и другие предметы. Люди слышали раскатистый шум, как при грозе. Некоторые испытывали страх, но паники у людей не было. Колебания в виде двух-трех толчков продолжались 3–5 секунд. В отдельных случаях образовались волосные трещины во внутренней отделке жилых комнат, трещин в стенах не было. В населенных пунктах Валерик и Ачхой-Мартан в нескольких случаях треснули стекла в пластиковых витражах.

Интенсивность колебаний 4 балла была зафиксирована в населенных пунктах Серноводская, Самашки, Грозный-запад, Октябрьское, Грозный-центр, Грозный-север, Грозный-восток, Аргун-центр, Старые Атаги, Чири-Юрт, Шали-Центр, Цоци-Юрт, Автуры. Здесь землетрясение ощутили многие люди, находящиеся в покое, особенно находящиеся на верхних этажах домов, и отдельные люди, находящиеся в движении. Некоторые испытывали испуг, редко страх, находящиеся вне помещений слышали гул.

Интенсивность сотрясений в 3 балла зафиксирована в 19 населенных пунктах на расстояниях до 88 км от эпицентра. Люди, находившиеся в покое, испытывали плавное покачивание. В домах отмечались малозаметные колебания висевших предметов, дребезжание посуды.

Обобщенные результаты оценки интенсивности сотрясений приведены в таблице 6, а соответствующая карта пунктов-баллов представлена на рисунке 5. На ней же нанесено вероятное положение изосейст равной балльности.

Проведение 5- и 4-балльных изосейст довольно хорошо обеспечено пунктами-баллами, они вытянуты с востока на запад субширотно, 5–6-балльная изосейста, показанная на врезке к рисунку 5, несколько развернута на запад-северо-запад, но ее проведение не столь уверенно из-за малого числа пунктов наблюдений, что объясняется труднодоступной горной местностью в этом районе. Трехбалльная изо-

сейста расширяется и принимает более округлый вид, также с незначительной широтной вытянутостью. Положение изолиний балльности не противоречит простиранию нодальных плоскостей механизма очага землетрясения.

Таблица 6 / Table 6

**Макросейсмические данные о землетрясении 12 декабря 2020 г.
(основной толчок) /
Macroseismic data on the earthquake of December 12, 2020
(main shock)**

№	Пункт/ Settlement	Δ, км/ km	Координаты/ Coordinates		№	Пункт/ Settlement	Δ, км/ km	Координаты/ Coordinates	
			φ°, N	λ°, E				φ°, N	λ°, E
	5–6 баллов/ 5–6 points					3 балла/ 3 points			
1	Марган-Чу	4.4	43.06	45.56	32	Шатой	19.7	42.87	45.69
2	Танги-Чу	6.9	43.07	45.51	33	Борзой	20.8	42.84	45.63
3	Рошни-Чу	11.9	43.09	45.45	34	Махкеты	29	42.96	45.90
4	Урус-Марган	11.2	43.12	45.54	35	Итум-Кали	31.6	42.73	45.57
5	Гехи	17.2	43.16	45.47	36	Ведучи	37.1	42.68	45.57
	5 баллов/ 5 points				37	Ведено	44.1	42.97	46.09
6	Гой-Чу	5.9	43.06	45.61	38	Химой	47.1	42.65	45.85
7	Гойты	16.3	43.16	45.62	40	Бачи-Юрт	56.3	43.22	46.19
8	Шалажи	18.6	43.10	45.36	41	Червлёная	59.8	43.50	45.88
9	Валерик	21.1	43.17	45.40	42	Левобережное	61.5	43.57	45.63
10	Катар-Юрт	22.7	43.17	45.37	43	Калиновская	61.6	43.57	45.52
11	Алхан-Юрт	22.2	43.22	45.56	44	Брагуны	63.7	43.43	46.09
12	Гикало	26.7	43.22	45.73	45	Ботлих	66	42.66	46.21
13	Алхан-Кала	27	43.26	45.53	46	Горагорский	65.9	43.50	45.08
14	Чечен-аул	27.2	43.20	45.78	47	Ножай-Юрт	67.1	43.09	45.37
15	Грозный-юг	28.7	43.27	45.65	48	Надтеречное	69.4	43.62	45.33
16	Закан-Юрт	29.2	43.26	45.42	49	Владикавказ	71.6	43.02	44.68
17	Ачхой-Марган	29.3	43.18	45.28	50	Шелковская	83.1	43.50	46.33
18	Ассиновская	39.4	43.24	45.18	51	Дылым	87.9	43.07	46.64
	4 балла/ 4 points					2–3 балла/ 2–3 points			
19	Чири-Юрт	16.7	43.08	45.74	52	Унцукуль	106	42.71	46.79
20	Ст. Атаги	18.7	43.12	45.74		2 балла/ 2 points			
21	Шали	31.7	43.15	45.90	53	Дубки	104	43.02	46.84
22	Октябрьское	32.1	43.30	45.57	54	Кизилюрт	108	43.20	46.87
23	Грозный-центр	33.9	43.31	45.69	55	Каранай	112	42.83	46.90
24	Грозный-запад	34.8	43.33	45.50	56	Буйнакск	129	42.82	47.12
25	Самашки	36.7	43.29	45.30	57	Нальчик	167	43.49	43.61
26	Грозный-восток	37.4	43.33	45.74		не ощущалось/ not felt			
27	Грозный-север	38.4	43.35	45.70	58	Хунзах	107	42.54	46.71
28	Аргун	39.2	43.29	45.86	59	Тлярата	121	42.11	46.36
29	Автуры	39.4	43.16	46.00	60	Аракани	127	42.61	46.99
30	Цоци-Юрт	43.6	43.24	46.00	61	Кумух	159	42.17	47.12
31	Серноводская	45.6	43.30	45.16	62	Уркарах	195	42.16	47.63

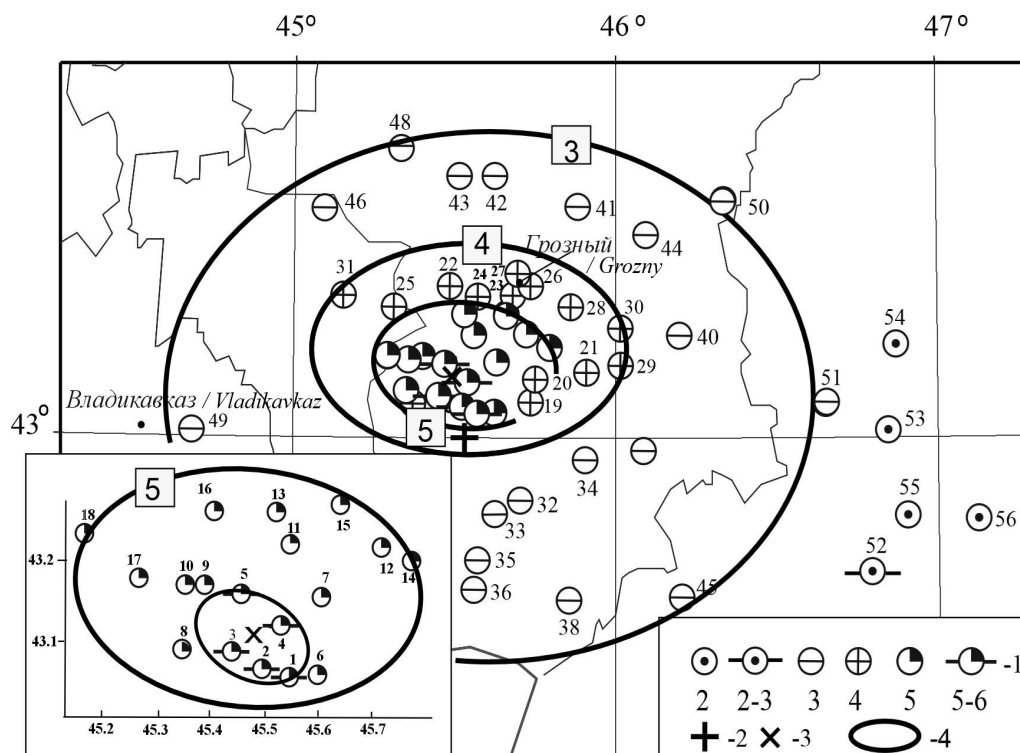


Рис. 5. Карта пунктов-баллов и изосейст равной балльности основного толчка землетрясения 12 декабря 2020 г. Внизу слева на врезке показана более детально область с 5-балльными и 5-6-балльными пунктами и изосейсты такой балльности

1 – интенсивность сотрясений в населенном пункте в баллах; 2 – положение инструментального эпицентра; 3 – положение макросейсмического эпицентра; 4 – изолинии балльности /

Fig. 5. A map of points and isoseists of equal magnitude of the main shock of the earthquake on December 12, 2020. The bottom left of the inset shows in more detail the area with 5-point and 5-6-point points and isoseists of such a score 1 – the intensity of concussions in a locality in points; 2 – the position of the instrumental epicenter; 3 – the position of the macroseismic epicenter; 4 – the isolines of the score

На основе собранных данных об интенсивности в населенных пунктах был построен график спада интенсивности в зависимости от гипоцентрального расстояния. На рисунке 6, кроме наблюдаемых данных, приведены кривые затухания согласно уравнениям макросейсмического поля с коэффициентами для Северного Кавказа ($b=1,6$, $v=3,1$, $c=2,2$) и Дагестана ($b=1,5$, $v=3,6$, $c=3,1$). Как видно, макросейсмический эффект землетрясения 12 декабря лучше всего описывается формулой с коэффициентами, предложенными для Дагестана [Кондорская, Шебалин, 1977].

Три сильнейших афтершока с $K_p \geq 10,8$ ощущались в основном в населенных пунктах Чеченской Республики: 12 декабря в 23^h50^m с $K_p=10,8$ – в Урус-Мартане, Чечен-Ауле, Грозном, Ачхой-Мартане – интенсивностью 3 балла; в Шали – 2 балла; 13 декабря в 11^h34^m с $K_p=12,3$ – в Урус-Мартане, Чечен-Ауле, Грозном, Ачхой-Мартане, Гой-Чу, Мартан-Чу, Танги-Чу, Рошни-Чу, Гехи – интенсивностью 5 баллов; в Шали, Аргуне, Цоци-Юрте, Серноводском, Самашках, Ассиновской, Автурах – 4 балла; в Махачкале – 2–3 балла; 13 декабря в 13^h05^m с $K_p=11,7$ – в Урус-Мартане, Чечен-Ауле, Грозном, Шали, Ачхой-Мартане – интенсивностью 3 балла.

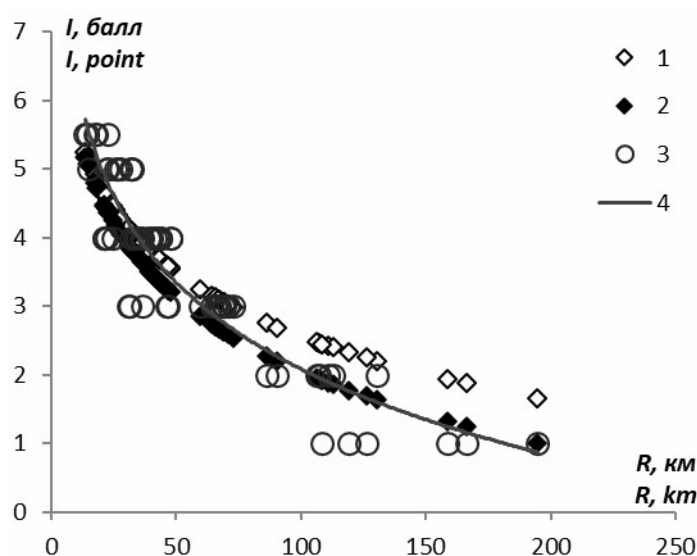


Рис. 6. График спада интенсивности сотрясений в баллах в зависимости от гипоцентрального расстояния R при землетрясении 12 декабря 2020 г.

1 – затухание по формуле: $I = 1,6 \times M_s - 3,1 \times \lg R + 2,2$; 2 – затухание по формуле: $I = 1,5 \times M_s - 3,6 \times \lg R + 3,1$; 3 – наблюдаемые данные; 4 – кривая, аппроксимирующая наблюдаемые данные /

Fig. 6. Graph of the decrease in the intensity of concussions in points depending on the hypocentral distance R during the earthquake on December 12, 2020.

1 – attenuation according to the formula: $I = 1,6 \times M_s - 3,1 \times \lg R + 2,2$; 2 – attenuation according to the formula: $I = 1,5 \times M_s - 3,6 \times \lg R + 3,1$; 3 – observed data; 4 – a curve approximating the observed data

Выводы

Землетрясение 12 декабря 2020 г. и сопровождающие его афтершоки произошли в Черногорской зоне ВОЗ ($M_{\max}=6,5$) Терско-Сунженской сейсмогенерирующей области, что является подтверждением сейсмической активности этой зоны. В названном блоке длительное время с 1984 г. вплоть до 12 декабря 2020 г. наблюдалось затишье на уровне магнитуд $M_s \geq 5,0$. Было установлено, что для землетрясения характерен быстрый спад афтершоковой активности, что возможно связано с его относительно невысокой энергией, а также с раздробленностью среды в очаговых зонах предыдущих сильных землетрясений. Были исследованы спектральные характеристики основного толчка, такие как скалярный сейсмический момент M_0 и спектральная моментная магнитуда M_w . Был определен механизм очага и получен взбросовый тип подвижки, характерный для структур Большого Кавказа. Простирание обеих нодальных плоскостей механизма очага землетрясения близко к субширотной ориентации Черногорского разлома. Сравнение механизма очага землетрясения 12 декабря 2020 г. с механизмом очага 8–9-балльного Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. показало подобие в типе движения – взброс. Максимальная интенсивность сотрясений в населенных пунктах составила 5–6 баллов по MSK-64. Полученная информация поможет глубже понять сейсмические процессы, влияющие на жизнь в сейсмически опасном районе на территории Чечнской Республики. Данные о произошедшем землетрясении и его многочисленных афтершоках необходимы для уточнения модели сейсмического воздействия и оценки уровня сейсмической опасности в регионе.

Литература

1. Асманов О.А., Гамидова А.М., Мусалаева З.А., Алисултанова Г.С. Каталог афтершоков Черногорского землетрясения 28 июля 1976 года в Чечено-Ингушетии. // Геодинамика и сейсмичность территории Дагестана. – 1979. – № 3(21). – С. 56–62.
2. Борисов Б.А., Рейснер Г.И. О геологической обстановке Чечено-Ингушского землетрясения 1976 г. // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 1977. – Т. 72. № 4. – С. 78–83.
3. Габсатарова И.П. Инструментальные параметры очага Курчалойского землетрясения 11 октября 2008 г. с $K_p=14.5$, $M_w=5.8$, $I_0=7-8$ (Чеченская Республика). // Землетрясения Северной Евразии в 2008 г. – 2014. – С. 433–447.
4. Зверева А.С., Габсатарова И.П., Лиходеев Д.В. Региональные особенности затухания сейсмических волн на территории Северного Кавказа. // Физика Земли. – 2024а. – № 6. – С. 64–79.
5. Зверева А.С., Скоркина А.А., Габсатарова И.П. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа в 2020 году. // Землетрясения Северной Евразии. – 2024b. – Вып. 27 (2020). – С. 242–254. DOI: 10.35540/1818-6254.2024.27.22.
6. Кондорская Н.В., Шебалин Н.В. Новый каталог землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. – 536 с.
7. Краснопевцева Г.В. Глубинное строение Кавказского сейсмоактивного региона. – М.: Наука, 1984. – 109 с.
8. Левкович Р.А., Амиров С.Р. Сейсмичность сейсмофокальной области «Дагестанский клин» и ее ближайшего окружения за исторический и инструментальный периоды наблюдений до землетрясения 14 мая 1970 года. // Мониторинг. Наука и технологии. – 2010. – № 2. – С. 42–46.
9. Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Международная шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
10. Михеева А.В., Дядьков П.Г., Марчук А.Г. Геоинформационная система GIS-EEDB и методы пространственно-временного анализа сейсмологических данных. // Геоинформатика. – 2013. – Т. 59. № 2. – С. 58–65.
11. Несмеянов С.А., Лутиков А.И., Шукин Ю.К., Донцова Г.Ю. Сейсмогенерирующие структуры. Комплексная оценка сейсмической опасности территории г. Грозный. М.: Минстрой России, 1996. – С. 38–47.
12. Прозоров А.Г. Динамический алгоритм выделения афтершоков для мирового каталога землетрясений. // Математические методы в сейсмологии и геодинамике (Вычислительная сейсмология, Вып. 19). М.: Наука, 1986. – С. 58–62.
13. Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А. Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизионного пояса. М.: ГЕОС, 2002. – 225 с.
14. Brune I.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. // Journal of Geophysical Research. – 1970. – V. 75. No. 26. – pp. 4997–5009.
15. Hanks T.S., Kanamori H. A moment magnitude scale. // Journal of Geophysical Research. – 1979. – Vol. 84. No. 135. – pp. 2348–2350.
16. Havskov J., Ottemoller L. Routine data processing in earthquake seismology: with sample data, exercises and software. Springer Science & Business Media, 2010. – 352 p.
17. Havskov J., Malone S., McCloud D., Crosson R. Coda Q for the state of Washington. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1989. – Vol. 79. – pp. 1024–1038.
18. Lee W.H.K., Lahr J.C. HYP071 (Revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. // U.S. Geological Survey. Open File Report 75-311. – 1975. – 116 p.
19. Waldhauser F., Ellsworth W.L. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward fault, California. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2000. – Vol. 90. No. 6. – pp. 1353–1368.
20. Waldhauser F. HypoDD – A program to compute double-difference hypocenter locations. // U.S. Geological Survey. Open File Report 01-113. – 2001. – 25 p.

References

1. Asmanov O.A., Gamidova A.M., Musalaeva Z.A., Alisultanova G.S. Catalog of aftershocks of the Chernogorskoe earthquake on 28 July 1976 in Checheno-Ingushetia. *Geodynamics and Seismicity of the Territory of Dagestan*. 1979. No. 3(21). pp. 56–62. (In Russ.)
2. Borisov B. A., Reisner G. I. On the geological setting of the Chechen-Ingush earthquake of 1976. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological series*. 1977. Vol. 72. No. 4. pp. 78–83. (In Russ.)
3. Gabsatarova I.P. Instrumental parameters of the Kurchaloi earthquake focus 11 October 2008, $K_p=14.5$, $M_w=5.8$, $I_0=7-8$ (Chechen Republic). *Earthquakes in Northern Eurasia*, 2008. 2014. pp. 433–447. (In Russ.)
4. Zvereva A.S., Gabsatarova I.P., Likhodeev D.V. Regional features of the attenuation of seismic waves in the North Caucasus. *Physics of the Earth*. 2024a. No. 6. pp. 64–79. (In Russ.)
5. Zvereva A.S., Skorkina A.A., Gabsatarova I.P. Spectral and source parameters of North Caucasus earthquakes in 2020. *Earthquakes in Northern Eurasia*, 27(2020). 2024b. pp. 242–254. DOI: 10.35540/1818-6254.2024.27.22. (In Russ.)
6. Kondorskaya N.V., Shebalin N.V. New catalog of strong earthquakes in the USSR from ancient times through 1975. Moscow. Nauka. 1977. 536 p. (In Russ.)
7. Krasnopevtseva G.V. The deep structure of the Caucasus seismically active region. Moscow. Nauka. 1984. 109 p. (In Russ.)
8. Levkovich R.A., Amirov S.R. Seismicity of the seismofocal region “Dagestan wedge” and its immediate surroundings for the historical and instrumental observation periods before the earthquake of 14 May 1970. *Monitoring. Science and Technology*. 2010. No. 2. pp. 42–46. (In Russ.)
9. Medvedev S.V. Shponhoyer V., Karnik V. MSK-64 International seismic intensity scale. Moscow. MGK Academy of Sciences USSR. 1965. 11 p. (In Russ.)
10. Mikheeva A.V., Dyadkov P.G., Marchuk A.G. Geoinformation system GIS-EEDB and methods of spatiotemporal analysis of seismological data. *Geoinformatics*. 2013. Vol. 59. No. 2. pp. 58–65. (In Russ.)
11. Nesmeyanov S.A., Lutikov A.I., Shchukin Yu.K., Dontsova G.Yu. Seismogenic structures. Comprehensive assessment of seismic hazard of the territory of Grozny. Moscow. Russian Ministry of Construction. 1996. pp. 38–47. (In Russ.)
12. Prozorov A.G. Dynamic algorithm for identifying aftershocks for the world catalog of earthquakes. *Mathematical methods in seismology and geodynamics (Computational seismology. Issue 19)*. Moscow. Nauka. 1986. pp. 58–62. (In Russ.)
13. Trifonov V.G., Soboleva O.V., Trifonov R.V., Vostrikov G.A. Modern geodynamics of the Alpine-Himalayan collision belt. Moscow. GEOS. 2002. 225 p. (In Russ.)
14. Brune I.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*. 1970. Vol. 75. No. 26. pp. 4997–5009.
15. Hanks T.S., Kanamori H. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*. 1979. Vol. 84. No. 135. pp. 2348–2350.
16. Havskov J., Ottemoller L. Routine data processing in earthquake seismology: with sample data, exercises and software. Springer Science & Business Media. 2010. 352 p.
17. Havskov J., Malone S., McCloud D., Crosson R. Coda Q for the state of Washington. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1989. Vol. 79. pp. 1024–1038.
18. Lee W.H.K., Lahr J.C. HYP071 (Revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. U.S. Geological Survey. Open File Report 75-311. 1975. 116 p.
19. Waldhauser F., Ellsworth W.L. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2000. Vol. 90. No. 6. pp. 1353–1368.
20. Waldhauser F. HypoDD – A program to compute double-difference hypocenter locations. U.S. Geological Survey. Open File Report 01-113. 2001. 25 p.

УДК 550.3

DOI: 10.46698/VNC.2025.78.66.007

Оригинальная статья

Система непрерывного мониторинга параметров трещин в горном массиве на основе резистивных датчиков

Ш.Г. Идармачев 

Институт геологии ДФИЦ РАН, Россия, 367010, г. Махачкала,
ул. Ярагского, 75, e-mail: idarmachev46@mail.ru

Статья поступила: 08.11.2024, доработана: 14.02.2025, принята к публикации: 17.02.2025

Резюме: Актуальность работы. Крупные обвалы скальных склонов играют ключевую роль не только в преобразовании ландшафтов в долгосрочном плане, но и представляют угрозу населенным пунктам и инфраструктуре хозяйственной деятельности человека. Механизмы обвальных процессов изучаются в мире многими геологами и геофизиками, для этого используются различные методы, как дистанционно-зондирования, так и методы, предусматривающие использование датчиков, установленных непосредственно на исследуемом участке. Важным моментом исследований потенциально обвальных массивов является изучение физических процессов, связанных с механизмом образования трещин в горных породах, деформаций, аномальных наклонов, происходящих перед обвалом. Для этого применяются различные методы мониторинга, например, сейсмометрические, деформационные, наклонметрические и др. **Целью** исследований является создание системы для мониторинга, позволяющей осуществить контроль над состоянием неустойчивых горных массивов с помощью высокоточных непрерывных наблюдений за изменением ширины трещин. **Методика исследований.** Особенность разработки – полная автоматизация измерений с помощью персонального компьютера и GSM-модема связи. Для измерения изменения размеров трещин используется резистивный датчик, сопряженный с 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем марки ЛА-50USB и ПК, программа которого производит осреднение данных для каждого часа и раз в сутки отправляет таблицу данных за 24-часовой период автоматически получателю по электронной почте. Точность измерений линейного датчика составляет ± 10 мкм. **Результаты** синхронных измерений ширины трещины на неустойчивом скальном массиве циферблатным и резистивным датчиками перемещения показывают совпадение общего тренда в сторону ее расширения до 2000 мкм. Методом непрерывной регистрации с электронным датчиком получена запись кратковременного аномального изменения ширины трещины, имеющего ступенчатую форму амплитудой 500 мкм. Природа данной аномалии неизвестна. На другом массиве с вертикальными трещинами установлено наличие суточного хода ширины трещины, связанного с термическими напряжениями в скальном массиве, вызванными солнечной радиацией и температурой воздуха. В период нагревания поверхности скального массива солнечной радиацией, начиная от 10 ч до 13 ч, наблюдается резкое увеличение ширины трещины.

Ключевые слова: термические напряжения, резистивный датчик линейного перемещения, солнечная радиация, сейсмодатчики, циферблатный микрометр.

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию Института геологии ДФИЦ РАН (FMSW-2085-0009).

Для цитирования: Идармачев Ш.Г. Система непрерывного мониторинга параметров трещин в горном массиве на основе резистивных датчиков. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 82-91. DOI: 10.46698/VNC.2025.78.66.007

DOI: 10.46698/VNC.2025.78.66.007

Original paper

The system of continuous monitoring of parameters of cracks in a mountain range on the basis of resistive sensors

S.G. Idarmachev 

Institute of Geology, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences,
75 M. Yaragskogo Str., Makhachkala 367010, Russian Federation,
e-mail: idarmachev46@mail.ru

Received: 08.11.2024, revised: 14.02.2025, accepted: 17.02.2025

Abstract: Relevance. Large collapses of rocky slopes play a key role not only in the transformation of landscapes in the long term, but also pose a threat to human settlements and the infrastructure of human economic activity. The mechanisms of collapse processes are studied by many geologists and geophysicists in the world, using various methods for this, both remote sensing and sensors installed directly at the site under study. A particularly important point in the research of potentially collapsing massifs is the study of physical processes related to the mechanism of cracks formation in rocks, deformations, and abnormal slopes occurring before the collapse. Various monitoring methods are used for this purpose, for example, seismometric, deformation, tilt, etc. **The aim** of the research is to create a monitoring system that allows monitoring the condition of unstable mountain ranges through high-precision continuous monitoring of changes in the width of cracks. **Methodology.** A special feature of the development is the complete automation of measurements using a personal computer and GSM communication modem. To measure the change in crack size, a resistive sensor is used, coupled with a 16-bit analog-to-digital converter of the LA-50USB brand and a PC, the program of which averages the data for each hour and automatically sends a 24-hour data table to the recipient by e-mail once a day. The measurement accuracy of the linear sensor is ± 10 microns. **The results** of synchronous measurements of the crack width on an unstable rock mass by dial and resistive displacement sensors show a coincidence of the general trend towards its expansion of 2000 microns. By the method of continuous recording with an electronic sensor, a recording of a short-term abnormal change in the crack width, having a stepped shape with an amplitude of 500 microns, was obtained. The nature of this anomaly is unknown. On another massif with vertical cracks, the presence of a diurnal course and crack width associated with thermal stresses in the rock massif caused by solar radiation and atmospheric temperature has been established. During the period of heating of the rock mass surface by solar radiation, from 10 h to 13 h, there is a sharp increase in the crack width.

Keywords: thermal stresses, resistive linear displacement sensor, solar radiation, seismic sensors, dial micrometer.

Acknowledgements: The work was carried out according to the state assignment of the Institute of Geology of the Russian Academy of Sciences (FMSW-2085-0009).

For citation: Idarmachev Sh.G. The system of continuous monitoring of parameters of cracks in a mountain range on the basis of resistive sensors. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 82-91. DOI: 10.46698/VNC.2025.78.66.007

Введение

Внезапность времени обрушения делает оползни и обвалы не только опасными, но и труднопредсказуемыми с точки зрения механизмов разрушения пород. Событию предшествует фаза подготовки, во время которой комплекс внутренних

и внешних процессов приводит массив горных пород в состояние неустойчивости, делая его восприимчивым к пусковым механизмам, таким как осадки, сейсмическое сотрясение грунта, колебания силы ветра и циклы замерзания-оттаивания. Краткий обзор триггерных механизмов рассмотрен в работе [Dietze et al., 2021]. В то же время множество других факторов, связанных с физико-механическими свойствами различных пород, влияющих на фазу подготовки процесса их разрушения, вносит свои существенные коррективы [Leith et al., 2014; Kemeny, 2003; Frayssines, Hantz, 2006; D'Amato et al., 2016; Идармачев и др., 2022]. Классическим подходом к изучению процессов разрушения пород является долгосрочный мониторинг, осуществляемый с помощью периодической фиксации изображений, дистанционного зондирования лазерными приборами или точечными измерениями с помощью специальных датчиков на участках с известной или ожидаемой активностью [Collins et al., 2018a; Di Maio et al., 2010; Dixon et al., 2018; Levy et al., 2010; Walter et al., 2020].

Для исследования опасных геологических процессов все чаще применяются сейсмические методы наблюдений. Сейсмические датчики могут регистрировать движение грунта, вызванное процессами, происходящими на поверхности земли или вблизи нее. В целом, сейсмические сети могут обнаруживать активность движения пород, определять координаты, изучать и делать выводы о кинетических характеристиках процесса, исследовать эволюционные процессы неустойчивости склонов [Dietze, 2019; Burtin et al., 2014; Larose et al., 2015; Идармачев и др., 2021], включая отслеживание движения масс в пространстве [Burtin et al., 2016; Cook et al., 2018]. В последние годы начали применять точечные методы наблюдений с применением деформационных датчиков [Walter et al., 2020] и сейсмических датчиков [Dietze et al., 2021], установленных непосредственно на объекте исследований. Однако ни один из этих подходов не может обеспечить детальное зондирование всего объема пород с помощью «точечного измерения». Для более полного понимания данного вопроса необходим геофизический мониторинг с достаточно большим количеством задействованных датчиков, позволяющих представить развитие процесса в большом объеме горных пород в режиме реального времени.

В настоящей работе приведены результаты, полученные с помощью электронного датчика для измерения относительного изменения длины, например, ширины трещины, сопряженного с персональным компьютером с дистанционным доступом к данным измерений. Для апробации аппаратной части проекта был выбран горный массив над населенным пунктом Гуниб (Дагестан), на котором Институт геологии ДФИЦ РАН проводит режимные наблюдения. Измерения проводятся на скальном массиве, отделенном от основной части скалы вертикальной трещиной. Ширина трещины в различных местах меняется от 1,5 м до 2,5 м. Ширина ее на месте, где установлены датчики, составляет 1,987 м. Датчиком линейного перемещения служит механический циферблатный микрометр, закрепленный на основной части скалы. Для связи микрометра с подвижной частью скального массива используется перекинутая через трещину вольфрамовая проволока, связанная жестко с микрометром [Идармачев и др., 2022]. При повторных измерениях отсчет изменения ширины трещины проводится относительно первого значения измерений. Погрешность измерений не превышает ± 10 мкм. Результаты измерений за период 2020–2024 гг.

показали увеличение ширины трещины на 12000 мкм. Вариации годового периода коррелируют с температурой воздуха.

Метод исследований

В качестве электронного микрометра используется резистивный датчик линейного перемещения китайского производства марки KTR 50, закрепленный рядом с циферблатным датчиком. Процесс измерения происходит следующим образом, на крайние контакты потенциометра подключается источник постоянного тока, а с одного крайнего контакта и со среднего подвижного контакта измеряется падение напряжения на резисторе, которое пропорционально линейному смещению штока датчика. Полное электрическое сопротивление датчика равно 4,78 кОм. Заявленная в характеристике датчика точность измерений при использовании источника питания 24 В составляет ± 10 мкм. Калибровка датчика производилась следующим образом. Мультиметром измеряется изменение напряжения при перемещении штока на 10000 мкм, при этом подвижная часть резистора располагается в среднем положении. Коэффициент пропорциональности между электрическим напряжением U (В) и смещением L (мкм) определяется по реальным измеренным значениям из графика, приведенного на рисунке 1. На нем приведены результаты синхронных измерений циферблатным и электронным датчиками за период 08.09.2024–27.10.2024. На графиках видно удовлетворительное сходство между ними, а также наличие тренда. За этот период по данным циферблатного датчика изменение ширины трещины составило 2000 мкм, а по резистивному – 0,19 В.

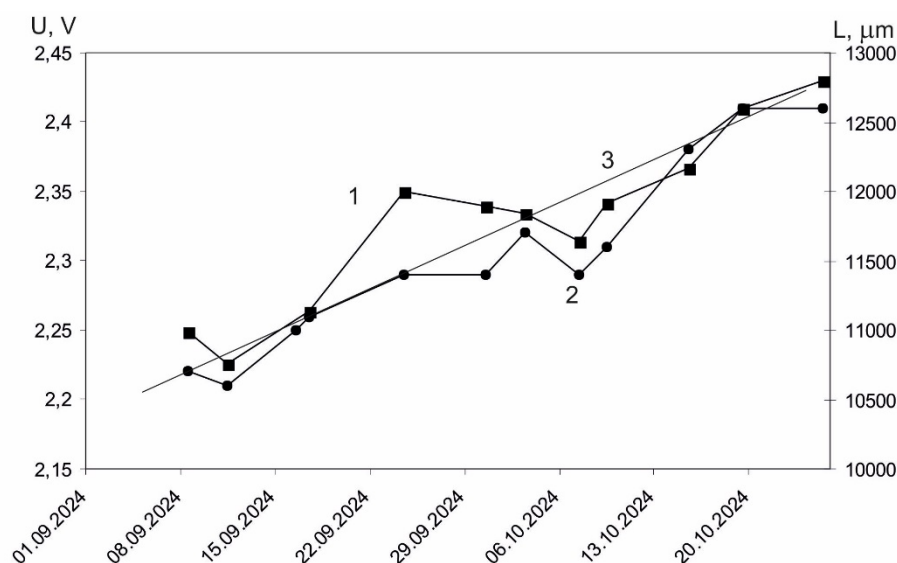


Рис. 1. Графики линейных датчиков циферблатного (1) и электронного (2) на массиве Верхний Гуниб; линия тренда (3) /
Fig. 1. Graphs of linear dial (1) and electronic (2) sensors on the Upper Gunib massif; trend line (3)

Непрерывная регистрация электронным датчиком осуществляется 16 разрядным аналого-цифровым преобразователем ЛА–50USB производства ОАО «Руднев-Шилиев», сопряженного с ПК. Процесс измерений и обработка данных осуществляется разработанной нами программой. Измерения осуществляются непре-

рывно с частотой 100 Гц, затем вычисляется среднее значение за 1 час и записывается на жесткий диск. Осреднение числа измеренных 36×10^4 значений для каждого часа позволяет увеличить точность измерений на порядок по сравнению с мультиметром. Среднее квадратическое отклонение часовых измерений не превышает ± 10 мкм. Таблица данных за суточный период в 12 часов по московскому времени автоматически отправляется по электронной почте получателю. В режиме реального времени можно получить доступ к текущим данным измерений по удаленному доступу ПК. Система позволяет осуществлять сбор данных от 16 различных датчиков. На рисунке 2 показан фрагмент аномального изменения ширины трещины, полученный в течение 3 суток в октябре 2023 г. Изменение произошло в течение 3 часов. Амплитуда смещения составила 500 мкм. Природа данной аномалии неизвестна.

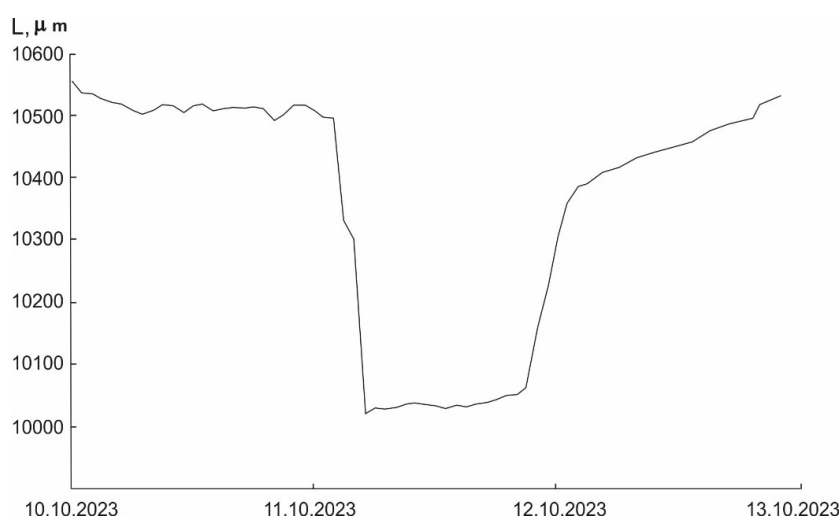


Рис. 2. Фрагмент аномального изменения ширины трещины /

Fig. 2. Fragment of anomalous crack width variation

Результаты работы

С помощью электронного датчика в том же районе на другом массиве, представляющего опасность обрушения, было исследовано суточное изменение ширины вертикальной трещины (рис. 3). Высота массива равна 12 м. Покрытая трещинами поверхность скального массива представлена пластами, которые отделяются от основной части скалы вертикальными трещинами. Механизм отслаивания пород связан не только с метеофакторами, но и с циклическими суточными изменениями температуры поверхности скалы от радиационного нагрева солнца. В высокогорных районах суточный перепад температуры воздуха может достигать 20–30°C, и тем самым создавать термические напряжения в породе, которые приводят к деформациям пластов и отслаиванию их от скалы. Процессы развития температурных напряжений в породе, предшествующие ее разрушению, изучаются в различных странах многими авторами [Aldred et al., 2016; Bakun-Mazor et al., 2020, 2013; Collins et al., 2018b; Collins et al., 2019; Gunzburger et al., 2005; Hall, Thorn, 2014]. На данном историческом этапе природа фазы подготовки непосредственно перед разрушением породы остается пока не до конца изученной.



Рис. 3. Фото неустойчивого массива с вертикальными отрывными трещинами /

Fig. 3. Photo of unstable massif with vertical breakaway cracks

На территории Гуниба минимальная температура воздуха в январе составляет -7°C , а максимальная достигает в июле 25 и более градусов. Данные температуры воздуха взяты на метеостанции «Гуниб».

На самом широком месте раскрытия трещины был установлен резистивный датчик для проведения суточных измерений. Относительные значения ширины трещины и суточный ход температуры воздуха, полученные в сентябре 2024 г., приведены на рисунке 4. Суточные колебания температуры воздуха составляют 10°C . Минимальное значение температуры воздуха наблюдается рано утром в 4–6 ч по московскому времени, а максимум – в 13 ч.

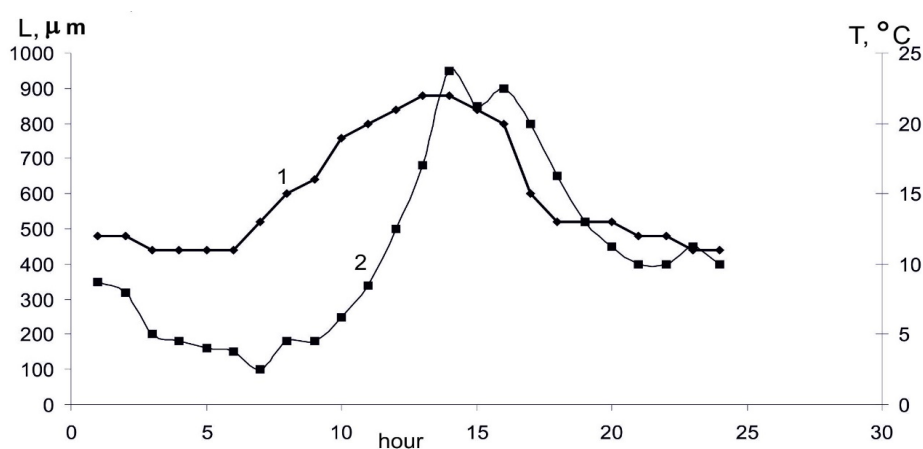


Рис. 4. Суточные графики изменения температуры воздуха (1) и ширины трещины скального массива (2) в сентябре 2024 г. /

Fig. 4. Daily plots of atmospheric temperature in September 2024 (1) and changes in the width of the rock massif crack (2)

Изменение ширины трещины коррелирует с температурой воздуха с некоторым отставанием по фазе на 1–2 ч. Это связано с тем, что для нагрева скалы требуется некоторое время. Максимальная амплитуда изменения ширины трещины составляет 850 мкм. В данном случае такое сравнение не совсем корректно, так как температура нагрева поверхности скалы от солнечной радиации будет выше температуры воздуха даже в ночное время. Такую разницу в ходах кривых можно видеть на рисунке 4 после 10 ч; с повышением интенсивности солнечной радиации происходит стремительный рост ширины трещины. В природе наблюдаются случаи взрывного отрыва поверхности скальных массивов при сильном нагреве от солнечной радиации [Walter et al., 2020]. Таким образом, солнечная радиация усиливает процесс нагревания горных пород, приводит к термическим напряжениям: увеличение температуры приводит к их расширению, а остывание – к сжатию. Образование в породе трещин различного ранга в конечном итоге приводит к разрушению породы.

Относительно данного массива следует отметить, что он представляет реальную угрозу обрушения, не только от влияния природных процессов, но и вследствие того, что он расположен на дороге «Махачкала - Верхний Гуниб». Под ним находится автомобильная дорога «висячей» конструкции, которая состоит из закрепленных в скале горизонтальных рельсов. Интенсивное автомобильное движение, в том числе грузовиков Камаз весом до 20 т, вызывает вибрацию массива, тем самым создавая дополнительные условия для снижения его устойчивости. Поэтому проводимые нами исследования по созданию системы непрерывного контроля за устойчивостью горных пород имеют не только научное, но и практическое значение по обеспечению безопасности населенного пункта Гуниб.

Выводы

1. Разработана система для мониторинга опасных геологических природных процессов с целью изучения пусковых механизмов неустойчивых массивов горных пород, приводящих к обвалам. Одна такая система позволяет подключать до 16 электрических датчиков линейного перемещения, установленных на трещинах различной ширины. Полевые испытания показали высокие метрологические характеристики резистивного датчика линейного перемещения. Погрешность измерений не превышает ± 10 мкм. Программная реализация измерений позволяет отправлять таблицу среднечасовых данных раз в сутки по электронной почте, а также получать удаленный доступ к данным в режиме реального времени.

2. Результаты измерений ширины трещины на неустойчивом скальном массиве циферблатным и электронным датчиками перемещения показывают наличие их синхронного хода. Методом непрерывной регистрации с электронным датчиком получена кратковременная запись аномального изменения ширины трещины неизвестной природы, имеющего ступенчатую форму.

3. Экспериментальными измерениями установлен суточный ход изменения ширины трещины, связанный с термическими напряжениями в скальном массиве, вызванными солнечной радиацией и температурой воздуха.

Литература

1. Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Идармачев И.Ш. Сейсмометрический мониторинг неустойчивого скального массива в Гунибском районе Дагестана (Северный Кав-

каз). // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 2. – С. 74–86. DOI: 10.46698/VNC.2021.49.57.006.

2. Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Алиев И.А., Идармачев И.Ш. Изучение динамики ширины трещины потенциально обвального скального массива струнным датчиком на горе Гуниб (Дагестан). // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 2. – С. 78–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.70.64.006.

3. Aldred J., Eppes M.C., Aquino K., Deal R. et al. The influence of solar-induced thermal stresses on the mechanical weathering of rocks in humid mid-latitudes. // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 2016. – Vol. 41. Issue 5. – pp. 603–614.

4. Bakun-Mazor D., Keissar Y., Feldheim A., Detournay C., Hatzor Y.H. Thermally-induced wedging–ratcheting failure mechanism in rock slopes. // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2020. – Vol. 53. – pp. 2521–2538.

5. Bakun-Mazor D., Hatzor Y.H., Glaser S.D., Carlos Santamarina J. Thermally vs. seismically induced block displacements in Masada rock slopes. // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2013. – Vol. 61. – pp. 196–211.

6. Burtin A., Hovius N., McArdeall B.W., Turowski J.M., Vergne J. Seismic constraints on dynamic links between geomorphic processes and routing of sediment in a steep mountain catchment. // *Earth Surface Dynamics*. – 2014. – Vol. 2. – pp. 21–33. DOI: 10.5194/esurf-2-21-2014.

7. Burtin A., Hovius N., Turowski J.M. Seismic monitoring of torrential and fluvial processes. // *Earth Surface Dynamics*. – 2016. – Vol. 4. – pp. 285–307. DOI: 10.5194/esurf-4-285-2016.

8. Collins B., Stock G.M., Eppes M.E. et al. Thermal influences on spontaneous rock dome exfoliation. // *Nature communications*. – 2018a. – Vol. 10. No. 762. – pp. 1–12. DOI: 10.1038/s41467-017-02728.1.

9. Collins B.D., Stock G.M., Eppes M.C. Relaxation response of critically stressed macroscale surficial rock sheets. // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2019. – Vol. 52. – pp. 5013–5023.

10. Collins B.D., Stock G.M., Eppes M.C., Lewis S.W., Corbett S.C., Smith J.B. Thermal influences on spontaneous rock dome exfoliation. // *Nature Communications*. – 2018b. – Vol. 9. Art. No. 762.

11. Cook K.L., Andermann C., Gimbert F., Adhikari B.R., Hovius N. Glacial lake outburst floods as drivers of fluvial erosion in the Himalaya. // *Science*. – 2018. – Vol. 362. Issue 6410. – pp. 53–57. DOI: 10.1126/science.aat4981.

12. D’Amato J., Hantz D., Jaboyedoff M., Baillet L., Mariscal A. Influence of meteorological factors on rockfall occurrence in a middle mountain limestone cliff. // *Natural Hazards and earth system Sciences*. – 2016. – Vol. 16. Issue 3. – pp. 719–735. DOI: 10.5194/nhes-16-719-2016.

13. Di Maio C., Vassallo R., Pascale S., Sdao F. Structure and kinematics of a landslide in a complex clayey formation of the Italian southern Apennines. // *Engineering Geology*. – 2010. – Vol. 116. Issue 3. – pp. 311–322.

14. Dietze M. Grain-size distribution unmixing using the R package EMMAgeo. // *Quaternary Science Journal*. – 2019. – Vol. 68. Issue 1. – pp. 29–46.

15. Dietze M., Krautblatter N., Illien L., Hovius N. Seismic constraints on rock damaging related to a failing mountain peak: the Hochvogel, Allgau. // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 2021. – Vol. 46. No. 2. – pp. 417–429. DOI: 10.1002/esp.5034.

16. Dixon N., Smith A., Flint J.A., Kyanna R., Clark B., Andjelkovich M. An acoustic emission landslide early warning system for communities in low-income and middle-income countries. // *Landslides*. – 2018. – Vol. 15. – pp. 1631–1644.

17. Frayssines M., Hantz D. Failure mechanisms and triggering in calcareous cliffs of the subalpine ranges (French Alps). // *Engineering Geology*. – 2006. – Vol. 86. – pp. 256–270. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.05.009.

18. Gunzburger Y., Merrien-Soukatchoff V., Guglielmi Y. Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability: case study of the Rochers de Valabres slope

(France). // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2005. – Vol. 42. – pp. 331–349.

19. Hall K., Thorn C.E. Thermal fatigue and thermal shock in bedrock: an attempt to unravel the geomorphic processes and products. // *Geomorphology*. – 2014. – Vol. 2006. – pp. 1–13.

20. Kemeny J. The time-dependent reduction of sliding cohesion due to rock bridges along discontinuities: A fracture mechanics approach. // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2003. – Vol. 36. – pp. 27–38. DOI: 10.1007/s00603-002-0032-2.

21. Larose E., Carriere S., Voisin C., Bottelin P., Baillet L. et al. Environmental seismology: What can we learn on earth surface processes with ambient noise? // *Journal of Applied Geophysics*. – 2015. – Vol. 116. – pp. 62–74. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2015.02.001.

22. Leith K., Moore J.R., Amann F., Loew S. In situ stress control on microcrack generation and macroscopic extensional fracture in exhuming bedrock. // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2014. – Vol. 119. – pp. 594–615. DOI: 10.1002/2012JB009801.

23. Levy C., Baillet L., Jongmans D., Mourot P., Hantz D. Dynamic response of the chamousset rock column (Western Alps, France). // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. – 2010. – Vol. 115(F4). – pp. 40–43. DOI: 10.1029/2009/JF001606.

24. Walter F., Amann S., Kos A., Kenner R., Phillips M., De Preux A. et al. Direct observations of a three million cubic meter rock-slope collapse with almost immediate initiation of ensuing debris flows. // *Geomorphology*. – 2020. – Vol. 351. – pp. 106933.

References

1. Idarmachev Sh.G., Cherkashin V.I., Idarmachev I.Sh. Seismometric monitoring of an unstable rock massif in the Gunib district of Dagestan (North Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 74–86. DOI: 10.46698/VNC.2021.49.57.006. (In Russ.)

2. Idarmachev Sh.G., Cherkashin V.I., Aliyev I.A., Idarmachev I.Sh. Studying the dynamics of the crack width of a potentially collapsing rock mass with a string sensor on Mount Gunib (Dagestan). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 78–88. DOI:10.46698/VNC.2022.70.64.006. (In Russ.)

3. Aldred J., Eppes M.C., Aquino K., Deal R. et al. The influence of solar-induced thermal stresses on the mechanical weathering of rocks in humid mid-latitudes. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2016. Vol. 41. Issue 5. pp. 603–614.

4. Bakun-Mazor D., Keissar Y., Feldheim A., Detournay C., Hatzor Y.H. Thermally-induced wedging–ratcheting failure mechanism in rock slopes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020. Vol. 53. pp. 2521–2538.

5. Bakun-Mazor, D., Hatzor Y.H., Glaser S.D., Carlos Santamarina J. Thermally vs. seismically induced block displacements in Masada rock slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013. Vol. 61. pp. 196–211.

6. Burtin A., Hovius N., McArdeall B.W., Turowski J.M., Vergne J. Seismic constraints on dynamic links between geomorphic processes and routing of sediment in a steep mountain catchment. *Earth Surface Dynamics*. 2014. Vol. 2. pp. 21–33. DOI: 10.5194/esurf-2-21-2014.

7. Burtin A., Hovius N., Turowski J.M. Seismic monitoring of torrential and fluvial processes. *Earth Surface Dynamics*. 2016. Vol. 4. pp. 285–307. DOI: 10.5194/esurf-4-285-2016.

8. Collins B., Stock G.M., Eppes M.E. et al. Thermal influences on spontaneous rock dome exfoliation. *Nature communications*. 2018a. Vol. 10. No. 762. pp. 1–12. DOI: 10.1038/s41467-017-02728.1.

9. Collins B.D., Stock G.M., Eppes M.C. Relaxation response of critically stressed macroscale surficial rock sheets. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019. Vol. 52. pp. 5013–5023.

10. Collins B.D., Stock G.M., Eppes M.C., Lewis S.W., Corbett S.C., Smith J.B. Thermal influences on spontaneous rock dome exfoliation. *Nature Communications*. 2018b. Vol. 9. Art. No. 762.

11. Cook K.L., Andermann C., Gimbert F., Adhikari B.R., Hovius N. Glacial lake outburst floods as drivers of fluvial erosion in the Himalaya. *Science*. 2018. Vol. 362. Issue 6410. pp. 53–57. DOI: 10.1126/science.aat4981.
12. D'Amato J., Hantz D., Jaboyedoff M., Baillet L., Mariscal A. Influence of meteorological factors on rockfall occurrence in a middle mountain limestone cliff. *Natural Hazards and earth system Sciences*. 2016. Vol. 16. Issue 3. pp. 719–735. DOI: 10.5194/nhes-16-719-2016.
13. Di Maio C., Vassallo R., Pascale S., Sdao F. Structure and kinematics of a landslide in a complex clayey formation of the Italian southern Apennines. *Engineering Geology*. 2010. Vol. 116. Issue 3. pp. 311–322.
14. Dietze M. Grain-size distribution unmixing using the R package EMMAgeo. *Quaternary Science Journal*. 2019. Vol. 68. Issue 1. pp. 29–46.
15. Dietze M., Krautblatter N., Illien L., Hovius N. Seismic constraints on rock damaging related to a failing mountain peak: the Hochvogel, Allgau. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2021. Vol. 46. No. 2. pp. 417–429. DOI: 10.1002/esp.5034.
16. Dixon N., Smith A., Flint J.A., Kyanna R., Clark B., Andjelkovich M. An acoustic emission landslide early warning system for communities in low-income and middle-income countries. *Landslides*. 2018. Vol. 15. pp. 1631–1644.
17. Frayssines M., Hantz D. Failure mechanisms and triggering in calcareous cliffs of the subalpine ranges (French Alps). *Engineering Geology*. 2006. Vol. 86. pp. 256–270. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.05.009.
18. Gunzburger Y., Merrien-Soukatchoff V., Guglielmi Y. Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability: case study of the Rochers de Valabres slope (France). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2005. Vol. 42. pp. 331–349.
19. Hall K., Thorn C.E. Thermal fatigue and thermal shock in bedrock: an attempt to unravel the geomorphic processes and products. *Geomorphology*. 2014. Vol. 2006. pp. 1–13.
20. Kemeny J. The time-dependent reduction of sliding cohesion due to rock bridges along discontinuities: A fracture mechanics approach. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2003. Vol. 36. pp. 27–38. DOI: 10.1007/s00603-002-0032-2.
21. Larose E., Carriere S., Voisin C., Bottelin P., Baillet L. et al. Environmental seismology: What can we learn on earth surface processes with ambient noise? *Journal of Applied Geophysics*. 2015. Vol. 116. pp. 62–74. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2015.02.001.
22. Leith K., Moore J.R., Amann F., Loew S. In situ stress control on microcrack generation and macroscopic extensional fracture in exhuming bedrock. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2014. Vol. 119. pp. 594–615. DOI: 10.1002/2012JB009801.
23. Levy C., Baillet L., Jongmans D., Mourot P., Hantz D. Dynamic response of the chamousset rock column (Western Alps, France). *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2010. Vol. 115(F4). pp. 40–43. DOI: 10.1029/2009/JF001606.
24. Walter F., Amann S., Kos A., Kenner R., Phillips M., De Preux A. et al. Direct observations of a three million cubic meter rock-slope collapse with almost immediate initiation of ensuing debris flows. *Geomorphology*. 2020. Vol. 351. pp. 106933.

УДК 550.343.4

DOI: 10.46698/VNC.2025.68.32.008

Оригинальная статья

Оценка сейсмической опасности территорий Казахстана на примере Жамбылской области

Н.В. Силачева^{id}, А.Д. Кудабаяева^{id}

Национальный научный центр сейсмологических наблюдений и исследований МЧС РК,
Казахстан, 050060, г. Алматы, пр. Аль-Фараби, 75а,
e-mail: silacheva_nat@mail.ru

Статья поступила: 20.01.2025, доработана: 25.02.2025, принята к публикации: 28.02.2025

Резюме: Актуальность работы. С переходом строительных государственных нормативов Республики Казахстан на основные принципы Еврокод 8 потребовалась разработка отвечающих этим принципам карт сейсмического зонирования. Первыми такими картами, вошедшими в строительные правила Республики Казахстан в 2017 и 2021 гг., стали комплекты карт общего сейсмического зонирования территории Казахстана и сейсмического микрозонирования г. Алматы. При их разработке применены вероятностный подход к оценке сейсмической опасности и ее представление как в баллах макросейсмической интенсивности, так и в количественных параметрах – пиковых ускорениях грунта. Следующим этапом на этом пути явился проект по детальному сейсмическому зонированию территорий областей и микрозонированию городов, поэтапно выполняющийся с 2021 г. В нем существенно обновлены все элементы вероятностной оценки опасности. В работе представлен современный подход к оценке сейсмической опасности и сейсмическому зонированию в Казахстане на примере Жамбылской области. **Цель исследований.** Вероятностная оценка сейсмической опасности и детальное сейсмическое зонирование Жамбылской области Казахстана в количественных параметрах. **Методы исследования.** Используются современные методы и инструменты анализа, а также наиболее полная и актуальная информация, имеющаяся для рассматриваемой территории. Исследования опирались на созданные в проекте геолого-геофизическую и сеймотектоническую основы оценки сейсмической опасности, включали изучение параметров сейсмического режима и сеймотектонической деформации земной коры, создание банка параметров колебаний грунта, определение системы моделей прогнозирования колебаний грунта, моделирование и параметризацию площадных и линейных сейсмических источников, вероятностный анализ сейсмической опасности, разработку карт детального сейсмического зонирования. **Результаты исследования.** В статье рассмотрены результаты оценки сейсмической опасности в количественных параметрах – пиковых ускорениях грунта и спектральных ускорениях. Разработан пакет карт детального сейсмического зонирования территории Жамбылской области Казахстана в пиковых ускорениях грунта для двух периодов повторяемости 475 и 2475 лет (вероятности превышения 10% и 2% за 50 лет). Созданные карты послужат основой для обновления строительных документов, будут способствовать интеграции в европейскую и мировую экономики, созданию условий для инвестиционных проектов и страхования, повышению сейсмической безопасности страны.

Ключевые слова: Жамбылская область Казахстана, оценка сейсмической опасности, детальное сейсмическое зонирование, вероятностные карты, ускорения грунта.

Благодарности: Работа представлена в рамках научно-исследовательского проекта «Оценка сейсмической опасности территорий областей и городов Казахстана на современной научно-методической основе» ИРН ПЦФ BR24992763.

Для цитирования: Силачева Н.В., Кудабаяева А.Д. Оценка сейсмической опасности территорий Казахстана на примере Жамбылской области. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 92-104. DOI: 10.46698/VNC.2025.68.32.008

DOI: 10.46698/VNC.2025.68.32.008

Original paper

Seismic hazard assessment of Kazakhstan territory on the example of Zhambyl region

N.V. Silacheva^{id}, A.D. Kudabayeva^{id}

National Center for Seismological Observations and Research,
Ministry for Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan,
75a Al-Farabi Ave., Almaty 050060, Kazakhstan,
e-mail: silacheva_nat@mail.ru

Received: 20.01.2025, revised: 25.02. 2025, accepted: 28.02.2025

Abstract: Relevance. With the transition of state construction standards of the Republic of Kazakhstan to the basic principles of Eurocode 8, the development of seismic zoning maps that meet these principles was also required. The first such maps included in the construction rules of the Republic of Kazakhstan in 2017 and 2021 were Maps of General Seismic Zoning of the territory of Kazakhstan and Seismic Microzonation Maps for the city of Almaty. When developing them, a probabilistic approach was used to assess seismic hazard and its representation not only in macroseismic intensities, but also in quantitative parameters – peak ground accelerations. The next stage was a project for detailed seismic zoning of regions and microzonation of cities, implemented in stages since 2021. It significantly updates all elements of the probabilistic hazard assessment. The paper presents a modern approach to seismic hazard assessment and seismic zoning in Kazakhstan using the example of the Zhambyl Region. **Aim.** Probabilistic seismic hazard assessment and detailed seismic zoning of the Zhambyl Region of Kazakhstan in quantitative parameters. **Methods.** Modern methods and analysis tools were used, as well as the most complete and up-to-date information available for the territory under consideration. The research was based on the geological, geophysical and seismotectonic basis for assessing seismic hazard, created in the project, and included a study of the parameters of the seismic regime and seismotectonic deformation of the Earth's crust, the creation of a bank of ground motion parameters, the definition of a system of ground motion models, modeling and parameterization of areal and linear seismic sources, probabilistic analysis of seismic hazard, and the development of detailed seismic zoning maps. **Results.** The article discusses the results for estimates in quantitative parameters – peak ground accelerations and spectral accelerations. A set of detailed seismic zoning maps for the territory of the Zhambyl Region of Kazakhstan in peak ground accelerations for two return periods of 475 and 2475 years (probabilities of exceedance of 10% and 2% in 50 years) has been developed. The created maps will serve as the basis for updating construction regulations, will contribute to integration into the European and world economies, create conditions for investment projects and insurance, and increase the country's seismic safety.

Keywords: Zhambyl Region of Kazakhstan, seismic hazard assessment, detailed seismic zoning, probabilistic maps, ground acceleration.

Acknowledgements: The work is presented within the framework of the research project “Seismic hazard assessment of the territories of regions and cities of Kazakhstan on a modern scientific and methodological basis” No. BR24992763.

For citation: Silacheva N.V., Kudabayeva A.D. Seismic hazard assessment of Kazakhstan territory on the example of Zhambyl region. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2025. 15(1): 92-104. DOI: 10.46698/VNC.2025.68.32.008

Введение

С 2015 г. в Казахстане действует идентичный Еврокодам свод правил СП РК EN 1998-1:2004/2012 «Проектирование сейсмостойких конструкций. Часть 1: Общие

правила, сейсмические воздействия и правила для зданий» с Национальным приложением и соответствующими нормативно-техническими пособиями. Переход строительных государственных нормативов на основные принципы Еврокодов потребовал и разработки отвечающих этим принципам карт сейсмического районирования. Первыми такими картами, вошедшими в строительные правила Республики Казахстан в 2017 и 2021 гг., стали Карты общего сейсмического зонирования (ОСЗ) территории Казахстана (новая редакция [СП РК 2.03-30-2017*, 2021]) и Карты сейсмического микрозонирования (СМЗ) г. Алматы [СП РК 2.03-31-2020, 2020]. При их разработке применены вероятностный подход к оценке сейсмической опасности и ее представление не только в баллах макросейсмической интенсивности, но и в количественных параметрах – пиковых ускорениях грунта. Следующим этапом на этом пути явился проект по детальному сейсмическому зонированию (ДСЗ) территорий областей и микрозонированию (СМЗ) городов, поэтапно выполняющийся с 2021 г. [Silacheva, 2023]. Лежащая в его основе вероятностная оценка сейсмической опасности (ВОСО) выполнена на базе методологии, согласующейся с основными положениями Еврокода 8 и обновленной по сравнению с методологией, применявшейся при разработке карт ОСЗ территории Казахстана и СМЗ г. Алматы. Используются современные методы и инструменты анализа, а также наиболее полная и актуальная информация, имеющаяся для рассматриваемой территории. Обновлены не только базы данных, но и представление сейсмических источников – площадных, а теперь и активных разломов.

Жамбылская область расположена на юге Казахстана и занимает территорию 144,2 тыс. кв. км. Население составляет более 1,2 млн человек, причем территория области заселена неравномерно, наиболее густонаселены высокосейсмичные предгорные районы. Большая часть территории находится в пределах юго-восточной периферии молодой слабосейсмичной Туранской платформы. Южная граница и прилегающие к ней территории Узбекистана и Киргизии относятся к высокосейсмичной орогенной зоне, включающей в себя хребты Западного и Внутреннего Тянь-Шаня.

Первая попытка вероятностного районирования Жамбылской области выполнялась в 2010 г. в баллах макросейсмической шкалы и экспериментально в пиковых ускорениях грунта для трех уровней вероятности превышения расчетных значений 1%, 5% и 10% за 50 лет. За прошедшее десятилетие изменилась сейсмическая и сеймотектоническая изученность региона, создан высококачественный каталог землетрясений, значительно обновились мировые базы записей сильных движений грунта, и разработаны более достоверные модели их прогнозирования, разработано и постоянно совершенствуется специализированное программное обеспечение. Все эти факторы привели к необходимости современной оценки опасности и сейсмического районирования. Новые карты ДСЗ разрабатывались в масштабе 1:1000000 для вероятности превышения 10% и 2% за 50 лет (период повторяемости 475 и 2475 лет соответственно) в баллах макросейсмической интенсивности и пиковых ускорениях грунта (PGA). В данной статье рассмотрена ВОСО территории Жамбылской области Казахстана в PGA для скальных грунтовых условий.

Методика и данные

Исследования базируются на созданных в проекте геолого-геофизической и сеймотектонической информационных базах, включают изучение параметров сейсмического режима и сеймотектонической деформации земной коры, создание

банка параметров колебаний грунта, определение системы моделей прогнозирования колебаний грунта, моделирование и параметризацию площадных и линейных сейсмических источников, вероятностный анализ сейсмической опасности, разработку карт ДСЗ.

Вероятностный анализ выполнен по методике Корнелла [Cornell, 1968] с использованием методологического формализма Филда и др. [Field et al., 2003], реализованных в программном обеспечении для расчета сейсмической опасности и риска OpenQuake Engine [Pagani et al., 2014]. Основными элементами БОСО являются составление модели сейсмических очагов, характеристика распределения годового количества землетрясений в этих очагах по магнитуде, расчет сотрясений грунта в пункте от землетрясений всех возможных магнитуд из выделенных сейсмических очагов и оценка вероятности того, что рассчитанные сотрясения будут превышены за заданный период времени. БОСО дает количественную оценку вероятности превышения уровней колебаний грунта в пункте от различных очагов землетрясений, каждый из которых имеет определенные характеристики и сейсмогенерирующий потенциал. В заданных по сетке точках в исследуемом регионе выполнена оценка уровня колебаний грунта, который, как ожидается, будет превышен с заданной вероятностью и в течение фиксированного времени наблюдения (в нашем расчете с вероятностью превышения 10% и 2% за 50 лет).

Основой для составления и характеристики модели сейсмических очагов являются сеймотектоническая модель региона и каталог землетрясений. Частота возникновения землетрясений в каждой зоне характеризуется путем определения модели повторяемости землетрясений, которая наилучшим образом объясняет наблюдаемые данные, представительность которых предварительно проверяется. Из сеймотектонических соображений определяются тип подвижки, преобладающий механизм формирования разрыва и распределение глубин гипоцентров, а также ожидаемая магнитуда. Для расчета сотрясений грунта используются модели прогнозирования.

По сравнению с международными проектами CASHA-BU [<https://www.osti.gov/biblio/2318777>], SFRARR [Poggi et al., 2024], EMCA [Bindi et al., 2012] наши исследования более детализованы, выполняются в масштабе ДСЗ и, соответствуя основным положениям западной методики, включают также методические наработки советского периода. При моделировании сейсмических источников используются сеймотектоническая и геолого-геофизическая основы. Сейсмические источники в виде разломов основываются как на часто используемой зарубежной базе данных, так и на базе данных активных разломов территории области, разрабатываемой в этом проекте на основе многолетних казахстанских исследований.

Каталог землетрясений

При подготовке каталога землетрясений для Жамбылской области использован «Представительный каталог землетрясений», созданный в 2022 г. в рамках проекта «Оценка сейсмической опасности в Центральной Азии и унификация бюллетеней» CASHA-BU [<https://www.osti.gov/biblio/2318777>]. Для каталога Жамбылской области выполнено уточнение представительных магнитуд. График распределения магнитуд по времени за инструментальный период с выделением четырех визуально различающихся периодов представлен на рисунке 1. Периоды представительной регистрации и соответствующие им представительные магнитуды для каталога землетрясений Жамбылской области и ее 300-километровой буферной зоны пред-

ставлены в таблице 1. В связи с ограниченностью данных для региона и с учетом мировых тенденций в работе использовался каталог без декластеризации.

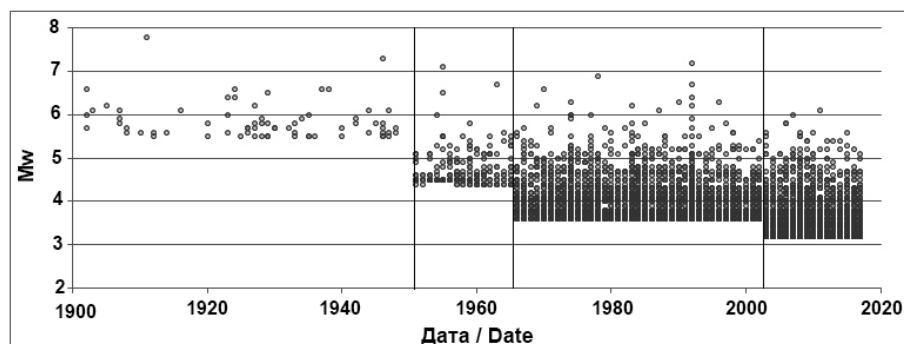


Рис. 1. Временные периоды (разделены линиями) с разными минимальными представительными магнитудами для территории Жамбылской области /

Fig. 1. Time periods (separated by lines) with different minimum complete magnitude for the territory of the Zhambyl Region

Таблица 1 / Table 1

Параметры представительности каталога землетрясений /
Completeness parameters of the earthquake catalog

Период времени/ Time period	Представительность Mw/ Mw completeness	Период наблюдения/ Observation period
1902-1950	$M_w \geq 5,5$	116 (1902-2017)
1951-1965	$M_w \geq 4,4$	67 (1951-2017)
1966-2002	$M_w \geq 3,6$	52 (1966-2017)
2003-2017	$M_w \geq 3,2$	15 (2003-2017)

При построении зависимости Гутенберга-Рихтера по полученному представительному каталогу, наблюдаемые данные показывают почти идеальную линейную связь между магнитудой и кумулятивной годовой частотой землетрясений, как для метода наименьших квадратов, так и для метода максимального правдоподобия, а значение b близко к 1 (рис. 2).

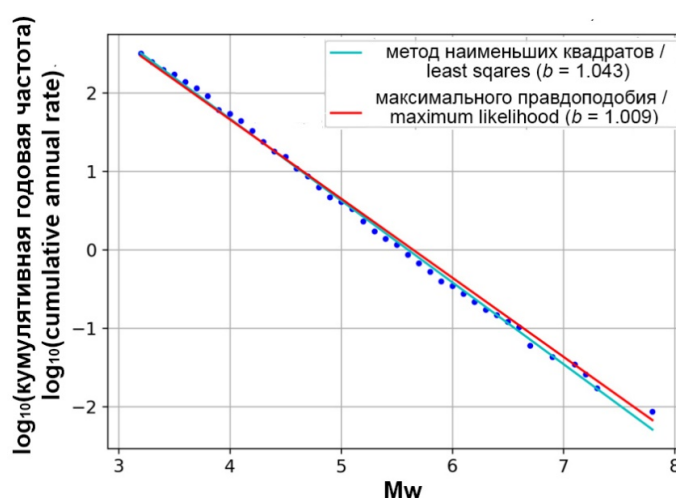


Рис. 2. Зависимость Гутенберга-Рихтера для представительного каталога /

Fig. 2. Gutenberg-Richter relation for the complete catalog

Моделирование и параметризация сейсмических источников

При оценке сейсмической опасности Жамбылской области разработана гибридная модель сейсмических источников, сочетающая прямое моделирование активных разломов и распределенное представление сейсмичности на основе каталога землетрясений на территории области и ее 300-километровой буферной зоны. Такой подход позволяет более реалистично воспроизвести картину сейсмичности, чем использование только площадных источников, как это делалось на более ранних этапах ВОСО в Казахстане [Silacheva et al., 2018].

Площадные источники строились в виде полигональных зон на основе ГИС-технологий. При выделении зон принимались во внимание характер распределения сейсмичности, соответствие важным топографическим и тектоническим особенностям, теоретически оцененный сейсмopotенциал. Построенная модель включила 56 площадных сейсмических источников (рис. 3). Площадь зон неодинакова и зависит также от плотности эпицентров землетрясений, количество которых влияет на устойчивость магнитудно-частотных характеристик зоны.

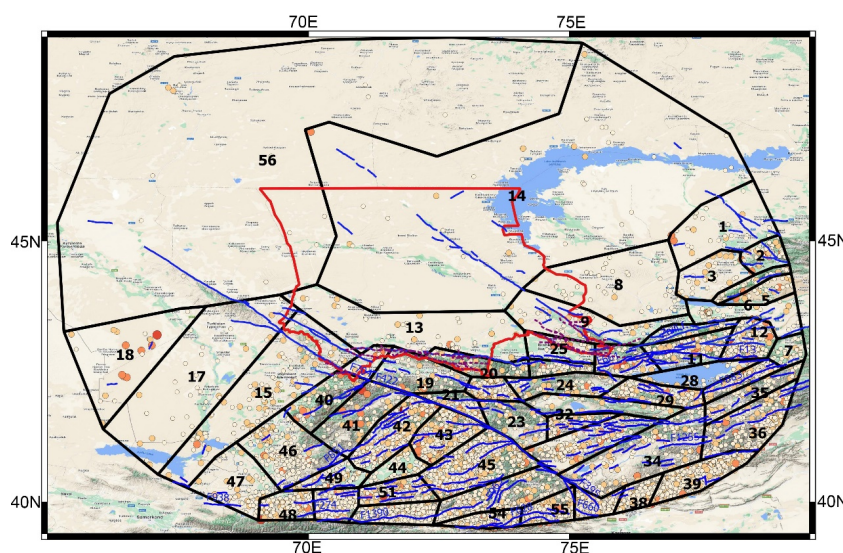


Рис. 3. Составление модели площадных сейсмических источников с учетом распределения сейсмичности, топографических особенностей и активных разломов /

Fig. 3. Development of a model of area seismic sources taking into account the distribution of seismicity, topographic features and active faults

При параметризации площадных источников определялись их геометрия, тектонический район, минимальная и максимальная (теоретическая) магнитуда, мощность сейсмоактивного слоя, кинематические параметры для преобладающего типа землетрясений, глубина гипоцентров, параметры магнитудно-частотного распределения. По тектоническому типу 55 зон отнесены к активным коровым деформациям, одна – к стабильным. Минимальная моментная магнитуда M_w при ВОСО обычно принимается равной 4,5. Максимальная зависит от длины самого большого разлома в пределах зоны и ограничивается размером зоны. Нами также учитывался потенциал сейсмогенерирующих зон [Тимуш и др., 2012] и исторические землетрясения. Кинематические параметры землетрясений (падение, простирание, наклон нодальной плоскости) оцениваются по механизмам очага в пределах зоны, глубина гипоцентров – из гистограммы глубин для зоны. Параметры магнитудно-частотного распределения землетрясений определялись из ограниченного уравнения Гутен-

берга-Рихтера для зоны, которое показывает кумулятивную годовую частоту событий в зависимости от их магнитуды (для представительного каталога) и ограничено заданными Mw_{min} (каталога) и Mw_{max} . При гибридном подходе внутри площадного источника моделируются разломы. В этом случае площадные источники представляют вклад землетрясений меньшей магнитуды, которая в нашем расчете ограничена значением $Mw \leq 6,3$. В зависимости от наличия разломов внутри зоны использовалось ограниченное распределение параметра b в уравнении Гутенберга-Рихтера для максимальной расчетной магнитуды зоны (при отсутствии разломов) или для максимальной $Mw=6,3$ (при наличии разломов).

Моделирование активных разломов на территории Казахстана значительно затруднено из-за недостаточной изученности характеристик большинства разломов, особенно в части их кинематических параметров, характеристик залегания, оценки скоростей скольжения по разлому. Литературные и архивные данные по скоростям скольжения очень ограничены и не согласуются между собой, либо оценены в рамках очень больших диапазонов, как в [Zelenin et al., 2022]. Само местоположение разломов различно на картах активных разломов из разных источников. Для повышения достоверности расчетов в анализе использовано две модели сейсмических источников в виде конечных разломов. Одна модель разработана на основе базы активных разломов, полученной на основе информации из геологической литературы, отчетов проводившихся ранее геолого-геофизических исследований, имеющихся геологических карт (аналогично [Курилова и др., 2022]). Другая – на основе Базы данных активных разломов Евразии AFEAD [Zelenin et al., 2022]. Сейсмогенерирующие структуры, входящие в указанные базы, преобразованы в модели сейсмических источников в виде конечных разломов. При анализе сейсмической опасности с использованием гибридной модели сейсмических очагов (активные разломы и площадные зоны) рассматривались активные разломы с магнитудой начиная от $Mw=6,4$.

Модель активных разломов на основе AFEAD показана на рисунке 4а. Модель, составленная по материалам Института сейсмологии (IS), показана на рисунке 4б. Разломы в буферной зоне взяты из первой модели. При достаточной согласованности разломов, входящих в две описанные модели, они заметно различаются сегментацией, что сказывается на величине максимальной магнитуды Mw_{max} . Так, например, Кендыктаская зона разломов (к юго-западу от оз. Балхаш) вошла в модель разломов на основе AFEAD (рис. 4а), а в случае базы IS (рис. 4б) сегменты разломов этой зоны имеют максимальную магнитуду ниже 6,4 и описываются площадными сейсмическими источниками. В анализе сейсмической опасности модели приняты с весовыми коэффициентами – 40% и 60%.

Характеристика разломов для расчетной модели включает их геометрию, сеймотектоническую характеристику района, мощность сейсмоактивного слоя, оценку углов простираия и падения нодальной плоскости разлома, вероятную магнитуду Mw , при которой на разломе могут многократно образовываться разрывы, магнитудно-частотные параметры, полный сейсмический момент M_0 (по [Youngs et al., 1985]) и ряд других параметров, включая весовые функции.

Модели прогнозирования движений грунта

Большая часть рассматриваемой территории характеризуется активным сеймотектоническим режимом – это зоны 1-55 модели площадных сейсмических ис-

точников (рис. 4). К районам со стабильным режимом можно отнести север и северо-восток территории (часть Казахского щита и молодой Туранской платформы), охватываемые 56 зоной модели.

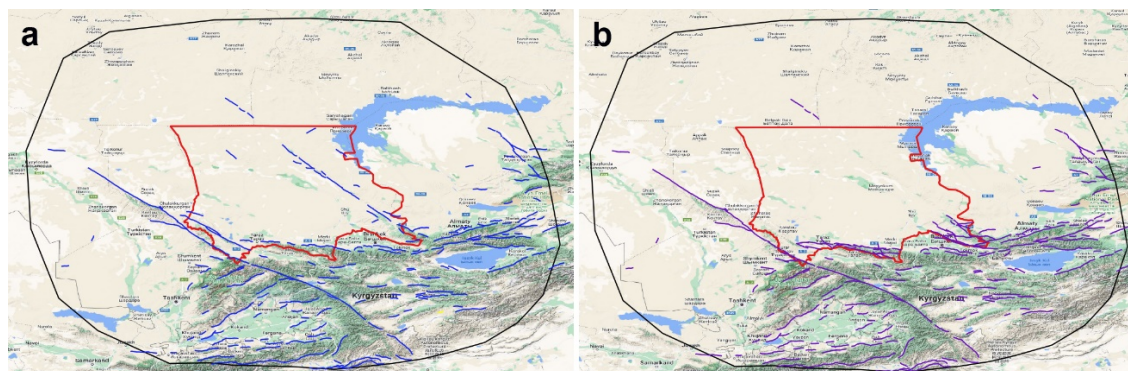


Рис. 4. Модели активных разломов ($M_{w_{max}} \geq 6.4$) на основе базы активных разломов AFEAD (a) и базы IS (b). Разломы и элементы разломов показаны синими линиями /

Fig. 4. Models of active faults ($M_{w_{max}} \geq 6.4$) based on the AFEAD active fault database (a) and the IS database (b). Faults and fault elements are shown as blue lines

Поскольку уровень ускорений, зарегистрированных имеющимися сейсмологическими станциями на территории Жамбылской области, недостаточен для использования этих записей в тестировании моделей прогнозирования движений грунта (GMM), использовались записи, полученные в других регионах Казахстана с активным сеймотектоническим режимом.

Исследование по отбору и тестированию моделей для активного тектонического режима включало анализ зарегистрированных пиковых и спектральных ускорений и их графиков невязок – разностей натуральных логарифмов наблюдаемых и модельных значений. Также учитывалось наличие моделей в библиотеке GMM программного комплекса Open Quake Engine (<https://docs.openquake.org/oq-engine/3.10/hazardlib.html>). Для BOCO в PGA в тектонически активных районах Жамбылской области отобраны 5 моделей: три модели проекта NGA-West2 [Bozorgnia et al., 2014] AbrahamsonEtAl2014 [Abrahamson et al., 2014], BooreEtAl2014 [Boore et al., 2014], ChiouYoungs2014 [Chiou et al., 2014] и модели ZhaoEtAl2016Asc [Zhao et al., 2016] и AkkarBommer2010 [Akkar et al., 2010]. Две последние модели лучше согласуются с данными, чем модели NGA-West2, и включены в расчет с большими весовыми коэффициентами. Набор GMM для тектонически стабильной зоны включил модели проекта NGA-East: Boore2015NGAEastAB14, DarraghEtAl2015NGAEast1CCSP, ShahjouiPezeschk2015NGAEast и YenierAtkinson2015 NGAEast [Goulet et al., 2021].

Анализ сейсмической опасности

Логическое дерево сейсмических источников включало две гибридные модели – сочетание площадных источников с двумя моделями активных разломов. Логическое дерево GMM для случая PGA включало наборы из 5 GMM для коровых землетрясений в тектонически активных районах и из 3 GMM для землетрясений в стабильных районах. Весовые коэффициенты отдельных ветвей определялись с учетом тестовых расчетов. Анализ выполнен для двух уровней вероятности превышения расчетных значений 10% и 2% за 50 лет (период повторяемости 475 и 2475 лет соответственно). Расчеты сейсмической опасности выполнены в средних значениях

среднегеометрических пиковых ускорений грунта (PGA в долях g) для территории, включающей Жамбылскую область в пределах $41,9^{\circ}$ – $46,5^{\circ}$ с. ш. и $68,5^{\circ}$ – $76,3^{\circ}$ в. д. по сетке с интервалом 5 км в обоих направлениях. Для каждой расчетной точки учитывалось воздействие от расположенных в пределах радиуса 300 км сейсмических источников с учетом их сеймотектонического режима. Грунтовые условия соответствуют скальным и скально-подобным геологическим формациям, для поверхностных 30-метровых толщ которых типичны скорости распространения поперечных волн $V_{s30} \geq 800$ м/с.

Основными выходными результатами анализа явились файлы данных для карт опасности, а также кривые опасности и однородные спектры реакции для отдельных пунктов.

Результаты и обсуждение

Полученные кривые опасности для городов Жанатас, Каратау, Тараз и Шу на территории Жамбылской области показаны на рисунке 5. Однородные спектры опасности для рассмотренных уровней вероятности 10% и 2 % за 50 лет приведены на рисунке 6 а, б. Вероятностные карты-схемы ДСЗ для Жамбылской области показаны на рисунке 7 а, б.

Как видно из полученных данных (рис. 5–7) уровень PGA возрастает с севера на юг в направлении высокосейсмичных приграничных южных районов Казахстана. На картах ДСЗ при вероятности превышения 10% за 50 лет полученные значения лежат в диапазоне 0,025–0,468 g , при 2% за 50 лет – в диапазоне 0,074–0,960 g . Максимальные значения прогнозируются на юго-востоке в зоне активных разломов.

На полученных картах ДСЗ значения превышают полученные при первых попытках вероятностного районирования 2010 г. Это объясняется существенным улучшением методики и качества анализируемых данных. Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с Картой ОСЗ территории Казахстана 2017 г. [СП РК 2.03-30-2017*, 2021]. За счет использования не только зональных источников, но и активных разломов, тщательной очистки каталога от взрывов и уточнения карты разломов, получены более выраженные, чем при ОСЗ Казахстана, зоны повышенной опасности в зоне активных разломов на юге области. На севере территории также повысились значения ожидаемых ускорений за счет более аккуратного учета сеймотектонических условий и сейсмического потенциала территорий со стабильным режимом.

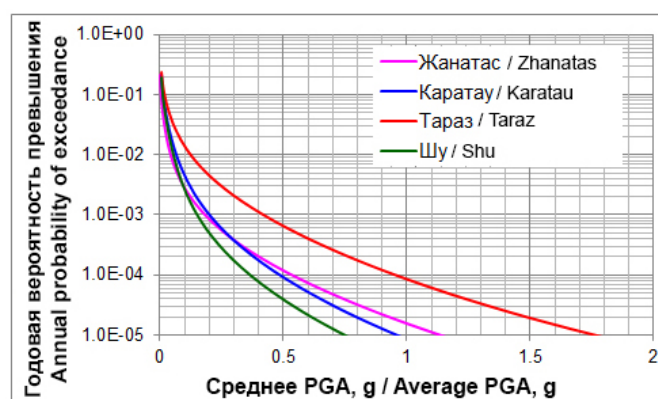


Рис. 5. Кривые опасности для городов Жанатас, Каратау, Тараз и Шу (для скального грунта) /
Fig. 5. Hazard curves for the cities of Zhanatas, Karatau, Taraz and Shu (for rock)

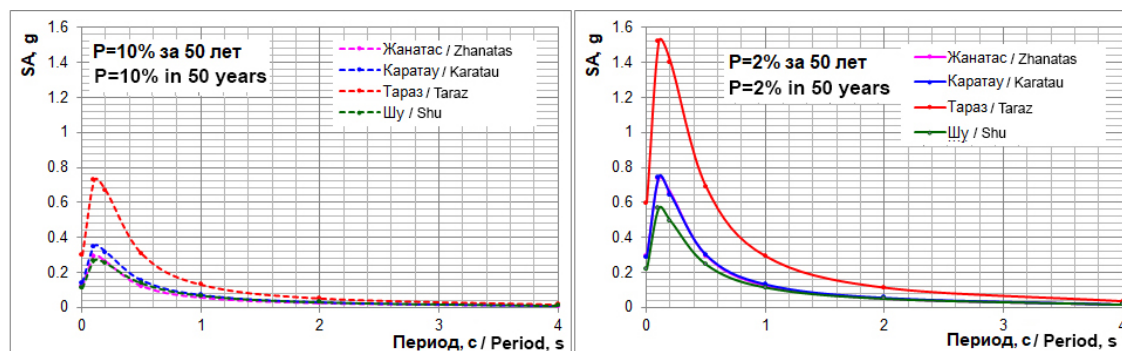


Рис. 6. Однородные спектры опасности для городов Жанатас, Каратау, Тараз и Шу с вероятностью превышения 10% и 2% за 50 лет (для скального грунта) /

Fig. 6. Uniform hazard spectra for the cities of Zhanatas, Karatau, Taraz and Shu with a probability of exceedance 10% and 2% in 50 years (for rock)

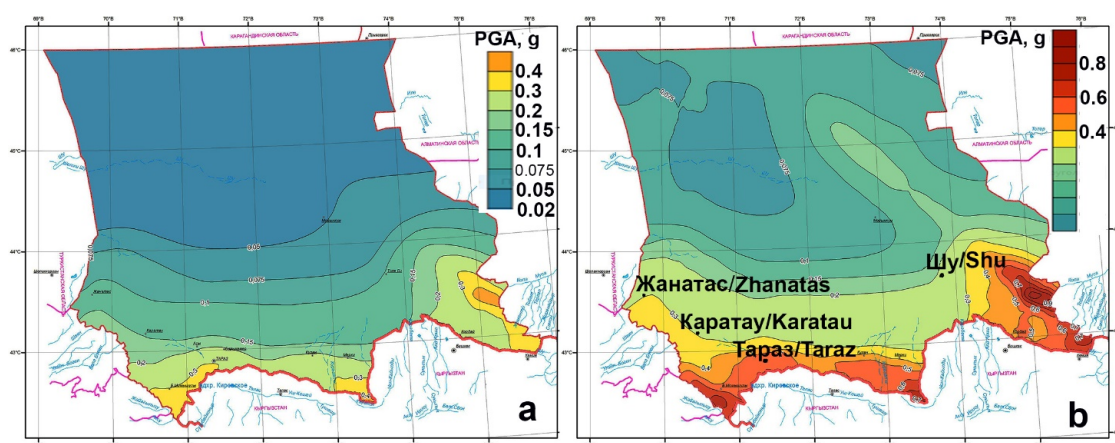


Рис. 7. Карты-схемы ДСЗ территории Жамбылской области в пиковых ускорениях грунта. Вероятность превышения расчетной интенсивности 10% (а) и 2% (б) в течение 50 лет /

Fig. 7. Schematic maps of detailed seismic zoning of the territory of Zhambyl Region in peak ground accelerations. Probability of exceeding the calculated intensity of 10% (a) and 2% (b) in 50 years

Выводы

– Территория Жамбылской области Казахстана относится к сейсмически опасным и подлежащим разработке проектной документации на строительство с учетом сейсмичности.

– Необходимость создания карт сейсмического зонирования на современной методической основе обусловлена переходом строительных государственных нормативов Казахстана на основные принципы Еврокод 8.

– По результатам проведенных исследований разработан пакет карт детального сейсмического зонирования территории Жамбылской области Казахстана в пиковых ускорениях грунта для двух периодов повторяемости 475 и 2475 лет (вероятности превышения 10% и 2% за 50 лет).

– При разработке карт использованы современные методы и инструменты анализа, а также наиболее полная и актуальная информация, имеющаяся для рассматриваемой территории.

– В отличие от первой Карты ОСЗ территории Казахстана 2017 г. на новой методической основе, проект по ДСЗ областей включает моделирование не только площадных, но и линейных сейсмических источников.

– На территории Жамбылской области среднегеометрические значения пиковых ускорений грунта возрастают с севера на юг в направлении высокосейсмичных приграничных южных районов Казахстана в диапазоне 0,025–0,468 g при вероятности превышения 10% за 50 лет и 0,074–0,960 g при вероятности превышения 2% за 50 лет.

– Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с Картой ОСЗ территории Казахстана 2017 г. За счет учета как площадных, так и линейных источников и тщательной подготовки каталога получены более выраженные зоны повышенной опасности в районе активных разломов на юге области. На севере территории значения ожидаемых ускорений повысились за счет более аккуратного учета влияния сеймотектонических условий.

– Созданные карты послужат основой для разработки строительных правил Республики Казахстан и важным инструментом повышения сейсмической безопасности и подготовленности к сейсмическим бедствиям.

Литература

1. Курилова О.К., Степаненко Н.П. Разработка цифровой карты и атрибутивной базы данных тектонических разломов Алматинского сейсмоактивного района. // *Геология и охрана недр*. – 2022. – № 2. – С. 47–52.
2. СП РК 2.03-30-2017* Строительство в сейсмических зонах: свод правил Республики Казахстан. Астана: КазНИИСА, 2021. – 110 с.
3. СП РК 2.03-31-2020 Застройка территории города Алматы с учетом сейсмического микрозонирования: свод правил Республики Казахстан. Астана: КазНИИСА, 2021. – 61 с.
4. Тимуш А.В., Тарадаева Т.В., Степаненко Н.П., Садыкова А.Б., Сыдыков А. Сейсмогенерирующие зоны Казахстана. Алматы: Хай Текнолоджи, 2012. – 81 с.
5. Abrahamson A.A., Silva W.J., Kamai R. Summary of the ASK14 ground-motion relation for active crustal regions. // *Earthquake Spectra*. – 2014. – Vol. 30. No. 3. – pp. 1025–1055. DOI: 10.1193/070913EQS198M.
6. Akkar S., Bommer J.J. Empirical equations for the prediction of PGA, PGV and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region and the Middle. // *Seismological Research Letters*. – 2010. – Vol. 81. No. 2. – pp. 195–206.
7. Bindi D., Abdrakhmatov K., Parolai S., Mucciarelli M., Grünthal G., Ischuk A., Mikhailova N., Zschau J. Seismic hazard assessment in Central Asia: Outcomes from a site approach. // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2012. – Vol. 37. – pp. 84–91. DOI: 10.1016/j.soildyn.2012.01.016.
8. Boore D.M., Stewart J.P., Seyhan E., Atkinson G.M. NGA-West2 Equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PGA for shallow crustal earthquakes. // *Earthquake Spectra*. – 2014. – Vol. 30. No. 3. – pp. 1057–1085. DOI: 10.1193/070113EQS1.
9. Bozorgnia Y., Abrahamson N.A., Atik L. et al. NGA-West2 research project. // *Earthquake Spectra*. – 2014. – Vol. 30. No. 3. – pp. 973–987. DOI: 10.1193/072113EQS209M.
10. Chiou B.S.-J., Youngs R.R. Updated of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. // *Earthquake Spectra*. – 2014. – Vol. 30. No. 3. – pp. 1117–1153. DOI: 10.1193/072813EQS219M.
11. Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1968. – Vol. 58. – pp. 1583–1606.
12. Field E.H., Jordan T.H., Cornell C.A. OpenSHA: A developing community-modeling environment for seismic hazard analysis. // *Seismological Research Letters*. – 2003. – Vol. 74. – pp. 406–419. DOI: 10.1785/gssrl.74.4.406.
13. Goulet C.A., Bozorgnia Y., Atkinson G.M. et al. NGA-East ground-motion characterization model part I: Summary of products and model development. // *Earthquake Spectra*. – 2021. – Vol. 37(1_suppl). – pp. 1231–1282. DOI: 10.1177/87552930211018723.

14. Pagani M., Monelli D., Weatherill G., Danciu L., Crowley H. et al. OpenQuake engine: An open hazard (and risk) software for the global earthquake model. // *Seismological Research Letters*. – 2014. – Vol. 85. – pp. 692–702. DOI: 10.1785/0220130087.
15. Poggi V., Parolai S., Silacheva N., Ischuk A., Abdrakhmatov K., Kobuliev Z. et al. Harmonizing seismicity information in Central Asian countries: earthquake catalogue and active faults. // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2024. – Vol. 24. – pp. 2597–2613. DOI: 10.5194/nhess-24-2597-2024.
16. Silacheva N.V. On the probabilistic seismic hazard assessment in Kazakhstan. // *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2023. – Vol. 41(2). – pp. 1429–1437. DOI: 10.1007/s10706-022-02345-w.
17. Silacheva N.V., Kulbayeva U.K., Kravchenko N.A. Probabilistic seismic hazard assessment of Kazakhstan and Almaty city in peak ground accelerations. // *Geodesy and Geodynamics*. – 2018. – Vol. 9. – pp. 131–141. DOI: 10.1016/j.geog.2017.11.002.
18. Youngs R., Coppersmith K. Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1985. – Vol. 75. No. 4. – pp. 939–964. DOI: 10.1785/BSSA0750040939.
19. 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. DOI: 10.5194/essd-14-4489-2022.
20. Zhao J.X., Zhou Sh., Zhou J., Zhao Ch., Zhang H., Zhang Y., Gao P. et al. Ground-Motion prediction equations for shallow crustal and upper-mantle earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2016. – Vol. 106. No. 4. – pp. 1552–1569.

References

1. Kurilova O.K., Stepanenko N.P. Development of a digital map and attribute database of tectonic faults of the Almaty seismically active region. *Geology and bowels of the Earth*. 2022. No. 2. pp. 47–52. (In Russ.)
2. SP RK 2.03-30-2017* Construction in seismic zones. Code of Practice of the Republic of Kazakhstan. Astana. KazNIISA. 2021. 110 p. (In Russ.)
3. SP RK 2.03-31-2020 Development of the territory of Almaty city taking into account seismic microzonation: Code of Practice of the Republic of Kazakhstan. Astana. KazNIISA. 2021. 61 p. (In Russ.)
4. Timush A.V., Taradayeva T.V., Stepanenko N.P., Sadykova A.B., Sydykov A. Seismogenerative zones of Kazakhstan. Almaty. High Technology. 2012. 81 p. (In Russ.)
5. Abrahamson A.A., Silva W.J., Kamai R. Summary of the ASK14 ground-motion relation for active crustal regions. *Earthquake Spectra*. 2014. Vol. 30. No. 3. pp. 1025–1055. DOI: 10.1193/070913EQS198M.
6. Akkar S., Bommer J.J. Empirical equations for the prediction of PGA, PGV and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region and the Middle. *Seismological Research Letters*. 2010. Vol. 81. No. 2. pp. 195–206.
7. Bindi D., Abdrakhmatov K., Parolai S., Mucciarelli M., Grünthal G., Ischuk A., Mikhailova N., Zschau J. Seismic hazard assessment in Central Asia: Outcomes from a site approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2012. Vol. 37. pp. 84–91. DOI: 10.1016/j.soildyn.2012.01.016.
8. Boore D.M., Stewart J.P., Seyhan E., Atkinson G.M. NGA-West2 Equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PGA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*. 2014. Vol. 30. No. 3. pp. 1057–1085. DOI: 10.1193/070113EQS1.
9. Bozorgnia Y., Abrahamson N.A., Atik L. et al. NGA-West2 research project. *Earthquake Spectra*. 2014. Vol. 30. No. 3. pp. 973–987. DOI: 10.1193/072113EQS209M.

10. Chiou B.S.-J., Youngs R.R. Updated of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*. 2014. Vol. 30. No. 3. pp. 1117–1153. DOI: 10.1193/072813EQS219M.
11. Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1968. Vol. 58. pp. 1583–1606.
12. Field E.H., Jordan T.H., Cornell C.A. OpenSHA: A developing community-modeling environment for seismic hazard analysis. *Seismological Research Letters*. 2003. Vol. 74. pp. 406–419. DOI: 10.1785/gssrl.74.4.406.
13. Goulet C.A., Bozorgnia Y., Atkinson G.M. et al. NGA-East ground-motion characterization model part I: Summary of products and model development. *Earthquake Spectra*. 2021. Vol. 37(1_suppl). pp. 1231–1282. DOI: 10.1177/87552930211018723.
14. Pagani M., Monelli D., Weatherill G., Danciu L., Crowley H. et al. OpenQuake engine: An open hazard (and risk) software for the global earthquake model. *Seismological Research Letters*. 2014. Vol. 85. pp. 692–702. DOI: 10.1785/0220130087.
15. Poggi V., Parolai S., Silacheva N., Ischuk A., Abdrakhmatov K., Kobuliev Z. et al. Harmonizing seismicity information in Central Asian countries: earthquake catalogue and active faults. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2024. Vol. 24. pp. 2597–2613. DOI: 10.5194/nhess-24-2597-2024.
16. Silacheva N.V. On the probabilistic seismic hazard assessment in Kazakhstan. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2023. Vol. 41(2). pp. 1429–1437. DOI: 10.1007/s10706-022-02345-w.
17. Silacheva N.V., Kulbayeva U.K., Kravchenko N.A. Probabilistic seismic hazard assessment of Kazakhstan and Almaty city in peak ground accelerations. *Geodesy and Geodynamics*. 2018. Vol. 9. pp. 131–141. DOI: 10.1016/j.geog.2017.11.002.
18. Youngs R., Coppersmith K. Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1985. Vol. 75. No. 4. pp. 939–964. DOI: 10.1785/BSSA0750040939.
19. 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. DOI: 10.5194/essd-14-4489-2022.
20. Zhao J.X., Zhou Sh., Zhou J., Zhao Ch., Zhang H., Zhang Y., Gao P. et al. Ground-Motion prediction equations for shallow crustal and upper-mantle earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2016. Vol. 106. No. 4. pp. 1552–1569.

DOI: 10.46698/VNC.2025.99.31.009

Original paper

Clustering analysis of 100-year international seismic catalogue for Azerbaijan

T.H. Babayev^{id}, Y.N. Aliyev^{id}, G.R. Babayev^{id}

Institute of Geology and Geophysics, Ministry of Science and Education
of the Republic of Azerbaijan, 119 H. Javid Ave., Baku AZ1073, Azerbaijan,
e-mail: tural.babayev@gia.science.az

Received: 03.12.2024, revised: 12.02.2025, accepted: 14.02.2025

Abstract: Relevance. Azerbaijan is tectonically situated in the Arabian-Eurasian continent collision zone. Due to this collision activity the seismic pattern of the region is observed with the occurrence of frequent moderate and occasionally strong earthquakes. **Research methods.** In this study, we used a catalog of International Seismological Centre through the Azerbaijan region including the neighbor parts and aquatory (Caspian Sea). Catalog has been clustered according to the 6 tectonic mega-zones of Azerbaijan. **Aim.** The purpose of this paper is to expose the seismicity level of Azerbaijan employing the international catalog of earthquakes from 1926 to 2022. **Results.** We estimated the seismicity indicators for each cluster. *a*- and *b*-values of Gutenberg-Richter law have been evaluated for each cluster. We examined the precision of them computing the maximum magnitude uncertainty and the results seem to be precise enough where the maximum magnitude uncertainty values are close to 0. We defined magnitude of completeness around or above 4 for the clusters and the bin was defined 0.1 for each. The highest *a*- and *b*-values are observed in cluster I (Gusar-Shabran and aquatory) and cluster VI (Talysh mountains and aquatory). *a*-, *b*- values for cluster I are 6.97 and 1.16 respectively and for cluster VI are 11.89 and 2.17 respectively. The number of earthquakes with magnitude greater and equal to magnitude of completeness for cluster I and VI is 213 and 30 respectively. For clusters I, II, III, IV, and V, the number of earthquakes ($M \geq M_c$) are 399, 115, 318, 503 respectively. **Conclusions.** The seismic activity for each tectonic segment has been demonstrated in terms of the number of earthquakes with magnitude greater than 3.8, at least.

Keywords: Azerbaijan, seismicity indicators, *a*-value, *b*-value, maximum magnitude uncertainty, magnitude of completeness.

Acknowledgements: The authors are grateful to Republican Center of Seismic Survey of Azerbaijan (RCSS) and Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS) for the useful public seismic data provision. The research was performed in the Earthquake space-time analysis and hazard laboratory ESTAHL.

For citation: Babayev T.H., Aliyev Y.N., Babayev G.R. Clustering analysis of 100-year international seismic catalogue for Azerbaijan. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2025. 15(1): 105-118. DOI: 10.46698/VNC.2025.99.31.009

УДК 550.34.01

DOI: 10.46698/VNC.2025.99.31.009

Оригинальная статья

Кластерный анализ международного сейсмического каталога по Азербайджану за 100-летний период

Т.Х. Бабаев^{id}, Я.Н. Алиев^{id}, Г.Р. Бабаев^{id}

Институт геологии и геофизики, Министерство науки и образования
Азербайджанской Республики, Республика Азербайджан, AZ1073,
г. Баку, пр. Г. Джавида 119, e-mail: tural.babayev@gia.science.az

Статья поступила: 03.12.2024, доработана: 12.02.2025, принята к публикации: 14.02.2025

Резюме: Актуальность работы. Территория Азербайджана тектонически расположена в зоне столкновения Аравийской и Евразийской плит. В связи с этой коллизионной активностью сейсмическая картина региона характеризуется возникновением частых умеренных и порою сильных землетрясений. **Методы исследования.** В данном исследовании был использован каталог Международного Сейсмологического Центра (ISC) по Азербайджану, включая соседние территории и прилегающую акваторию Каспийского моря. Проведен кластерный анализ каталога в соответствии с существующими шестью тектоническими мегазонами Азербайджана. Целью исследования является оценка уровня сейсмичности территории Азербайджана по данным международного каталога землетрясений с 1926 по 2022 годы. **Результаты.** Оценены показатели сейсмичности, такие как параметры a и b в законе Гутенберга-Рихтера для каждого кластера. Проверена достоверность значений, оценивая степень неопределенности максимальной магнитуды. Была определена величина представительной магнитуды $M_s \geq 4$ для кластеров с интервалом в 0,1 для каждого кластера. Самые высокие значения параметров a и b наблюдаются в кластере I (Гусар-Шабран и прилегающая акватория) и в кластере VI (Талышские горы и прилегающая акватория). Значения параметра a и b для кластера I составляют 6,97 и 1,16 соответственно, а для кластера VI – 11,89 и 2,17, соответственно. Количество землетрясений с магнитудой, большей и равной величине представительной магнитуды для кластеров I и VI составляет 213 и 30, соответственно. Для кластеров I, II, III, IV и V количество землетрясений ($M \geq M_s$) составляет 399, 115, 318, 503, соответственно. **Выводы.** Таким образом, с учетом количества землетрясений оценочная сейсмическая активность для каждого тектонического сегмента характеризуется магнитудой $M > 3,8$.

Ключевые слова: Азербайджан, показатели сейсмичности, параметр a , параметр b , неопределенность максимальной магнитуды, представительная магнитуда.

Благодарности: Авторы выражают благодарность Республиканскому центру сейсморазведки Азербайджана и Объединенному научно-исследовательскому институту по сейсмологии за предоставление полезных открытых сейсмических данных. Исследования проводились в лаборатории пространственно-временного анализа и опасности землетрясений ESTANL.

Для цитирования: Бабаев Т.Х., Алиев Я.Н., Бабаев Г.Р. Кластерный анализ международного сейсмического каталога по Азербайджану за 100-летний период. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 105-118. DOI: 10.46698/VNC.2025.99.31.009

Introduction

Azerbaijan's seismicity is primarily driven by its location within the tectonically active region, where the Eurasian and Arabian plates are in continuous continent-continent collision, resulting in significant crustal deformation [Kangarli et al., 2022]. This interaction generates a complex seismic pattern characterized by frequent moderate and occasional strong earthquakes. The tectonic compression and faulting associated with

this convergence give rise to a series of active fault systems, most notably the Greater Caucasus thrust and the Lesser Caucasus fault zones, both of which are major contributors to the seismic hazard in the region [Zonenshain, Savostin, 1979].

Continuous seismic monitoring plays a crucial role in understanding the seismic behavior of Azerbaijan. The region experiences frequent tectonic activity due to the interaction of Africa–Arabia–Eurasia Plate System of which the activity is monitored by geodetic observations [Kadirov et al., 2024]. The seismicity in Azerbaijan related to these structural movements is characterized to be high [Kangarli et al., 2022; Khain, 2001; Azizbekov, 1968].

The aim of this study is the utilization of international catalogue in estimation of the seismic level of Azerbaijan in terms of seismicity indicators. The 1926 to 2022 international catalog was analyzed in terms of a - and b -values and the validity of a - and b -values estimations was checked with maximum magnitude uncertainty which all together are called as seismicity indicators [Omni, Hashemi, 2024].

Study Area. Azerbaijan

Geotectonics

Azerbaijan is laid on 6 tectonic structures: Samur (Gusar) – Devechi (Shabran), Eastern Greater Caucasus, Kur depression, Outer Lesser Caucasus, Inner Lesser Caucasus, Talysh Mountains [Alizadeh et al., 2016]. Samur-Devechi and Eastern Greater Caucasus megazones are part of the Greater Caucasus Fold-Mountain System. Eastern Greater Caucasus megazone consists of southern and southeastern slopes. Zagatala, Sheki, Lahich regions are included to the southern slope while the Bazarduzu, Shakhnabad-Khizi, Shakhdagh, Tengi-Beshbarmag, Shamakhi, Gobustan, Absheron regions are part of the southeastern slope. Kur depression is divided into Ganykh-Airichay valley, Jeiranchel-Ajinour submountain region, Kur-Araz depression, Pre-Lesser Caucasus sloping plain. Outer Lesser Caucasus and Inner Lesser Caucasus are the megazones of the Lesser Caucasus. The Outer Lesser Caucasus is divided into northeastern slope, eastern slope, southwestern slope while the Inner Lesser Caucasus megazone consists of Garabagh volcanic upland, Near-Araz ridges, Nakhchivan (Middle Araz) depression (fig. 1) [Alizadeh et al., 2016].



Fig. 1. Geomorphology map of Azerbaijan [Alizadeh et al., 2016].

Note: The legend of the map is given in table 1

Table 1

The legend of the Figure 1

Province	Region	Subregion	District
1	2	3	4
<i>The Crimean-Caucasian Mountain Land</i>			
Piedmont depressions and uplands	I Samur-Devechi (Shabran)		1. Samur-Devechi lowland 2. Gusar sloping plain
The Greater Caucasus	II Eastern Greater Caucasus	II ₁ Southern slope	3. Zagatala 4. Sheki 5. Lagich
		II ₂ Southeastern slope	6. Bazardyuzu 7. Shakhnabad-Khizi 8. Shakhdag 9. Tengi-Beshbarmag 10. Dyubrar 11. Shamakh 12. Gobustan 13. Absheron
South Caucasian depression	III Kur depression	III ₁ Ganykh-Airichay valley	14. Ganykh 15. Ismailly
		III ₂ Jeiranchel-Ajinour submountain region	16. Jeiranchel 17. Ajinour 18. Lengebiz-Alyat 19. Kharamy
		III ₃ Kur-Araz depression	20. Shirvan plain 21. Southeastern Shirvan 22. Near-Kur plain 23. Mughan plain 24. Salyan plain
		III ₄ Pre-Lesser Caucasus sloping plain	25. Ganja-Gazakh plain 26. Garabagh plain 27. Mil plain
<i>Western Asian Highlands</i>			
The Lesser Caucasus	IV Outer western ridges	IV ₁ Northeastern slope	28. Agstafa 29. Shamkir 30. Dashkesan-Agjakend 31. Shakhdag 32. Murovdagh
		IV ₂ Eastern slope	33. Lower Araz
		IV ₃ Southwestern slope	34. Kelbajar 35. Mykhteken 36. Kharmin
	V Inner Lesser Caucasus	V ₁ Garabagh volcanic upland	37. Gyzylbogaz-Ishygly 38. Alagel-Chalbayir 39. East Goycha 40. Yazyn
		V ₂ Near-Araz ridges	41. Daralagez 42. Zangazur 43. Bargushad
		V ₃ Nakhchivan (Middle Araz) depression	44. Sharur 45. Negram 46. Ordubad
	VI Talysh Mts.		47. Lenkaran lowland 48. Burovar ridge 49. Yardymly 50. Peshtasar ridge 51. Zuvand 52. Talysh

The Samur-Devechi and Kur structures are mostly covered with Quaternary rocks. The significant part of Inner Lesser Caucasus and Talysh mountains contain Paleogene volcanic-sedimentary rocks. Inner Lesser Caucasus also contains Devonian, Cretaceous, Neogene, Quaternary rocks, while Outer Lesser Caucasus contains mostly Jurassic and Cretaceous rocks. The Eastern Greater Caucasus range features a diverse geological composition, including Jurassic, Cretaceous, Paleogene, and Neogene rocks, along with slight Quaternary formations [Alizadeh et al., 2016].

Geodynamics

GPS measurements are necessary for studying crustal deformations. The deformation rates in Greater Caucasus Mountains range between 2 and 14 mm/year in the direction of NW to SE. The GPS observations show that the Earth's crust along the Kur depression moves towards the NNE. The GPS measurements state active convergence between the Lesser Caucasus, Kur Depression and the Greater Caucasus [Kadirov et al., 2024]. The Arabian Plate together with the Iranian block pushes the Lesser Caucasus towards the Kur depression which makes the Kur depression move under the Greater Caucasus at a rate of 8 mm/year that results with a thrust fault or a subduction zone [Aktug et al., 2009, 2013; Yetirmishli, Kazimov, 2022].

Seismicity

In the history of Azerbaijan, a large number of strong and destructive earthquakes have occurred in the past. The seismicity study in Azerbaijan involves two periods: pre-instrumental – historic and instrumental periods [Babayev, Agayeva, 2021]. In the historic period, the destructive and strong earthquakes were noted in ancient Arabic chronicles, manuscripts and travel books [Ashurbeyli, Bakuvi, 1958]. As the significant strong historical earthquakes in Azerbaijan following events could be noted: the earthquake of 427, the Ganja (Goygol) 1139, the Ganja 1235, the East Caucasus 1667, the Mashtaga 1842, several Shamakhi earthquakes (1192, 1667, 1668, 1669, 1828, 1859, 1868, 1872, 1902), the Ardabil 1924, the Lankaran 1913, the Caspian earthquakes (957, 1812, 1842, 1852, 1911, 1935, 1961, 1963, 1986, 1989, 2000). These earthquakes are well known for their severity that resulted with the Earth's surface relief deformations, buildings destructions, human losses [Babayev, Agayeva, 2021].

Shamakhi region is one of the seismically active regions of Azerbaijan [Babayev et al., 2020; Telesca et al., 2017]. Shamakhi region experienced a powerful earthquake with a magnitude of 6.9 on February 13, 1902 that is known as the Shamakhi earthquake which is considered the beginning of instrumental seismic studies in Azerbaijan [Babayev, Agayeva, 2021]. This event reached an intensity of IX in Shamakhi and Ismayilli cities [Weber, 1903]. The first earthquake in Azerbaijan of which the epicenter was determined by instrumental data is the Caspian earthquake of June 7, 1911 [Babayev, Agayeva, 2021].

One of the strongest earthquakes in recent history is the November 25, 2000 Baku-Caspian earthquake. The earthquake which was felt in Baku, occurred in two shocks of $M = 6.5$ and 6.3 with three minutes pause and the depth of the earthquake was $h = 35$ km [Babayev, Agayeva, 2021].

In 2023 and 2024 both the region of Azerbaijan and its neighbors sustain their activity. In fig. 2 we present the map of epicentral distribution of some selected earthquakes which occurred in 2023 and 2024 in Azerbaijan and close regions with local magnitude $M_l \geq 4.1$.

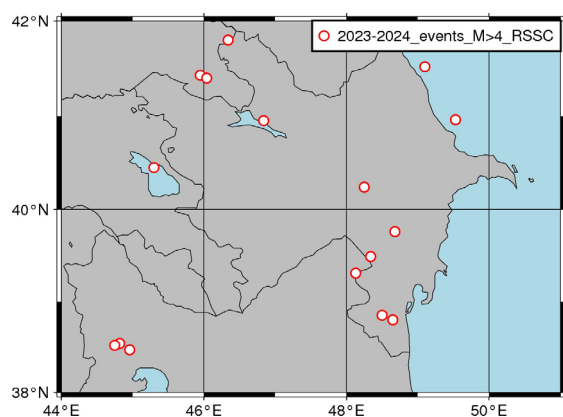


Fig. 2. Epicentral distribution of earthquakes occurred in 2023-24 years in Azerbaijan and neighbor regions (locations of the epicenters have been obtained from Republican Center of Seismological Service, RCSS)

Figs 3 and 4 represent the ground motion levels of those earthquakes occurred in 2023 and 2024 respectively, according to their acceleration data taken from IRIS and processed using ObsPy library of Python [Beyreuther et al., 2010].

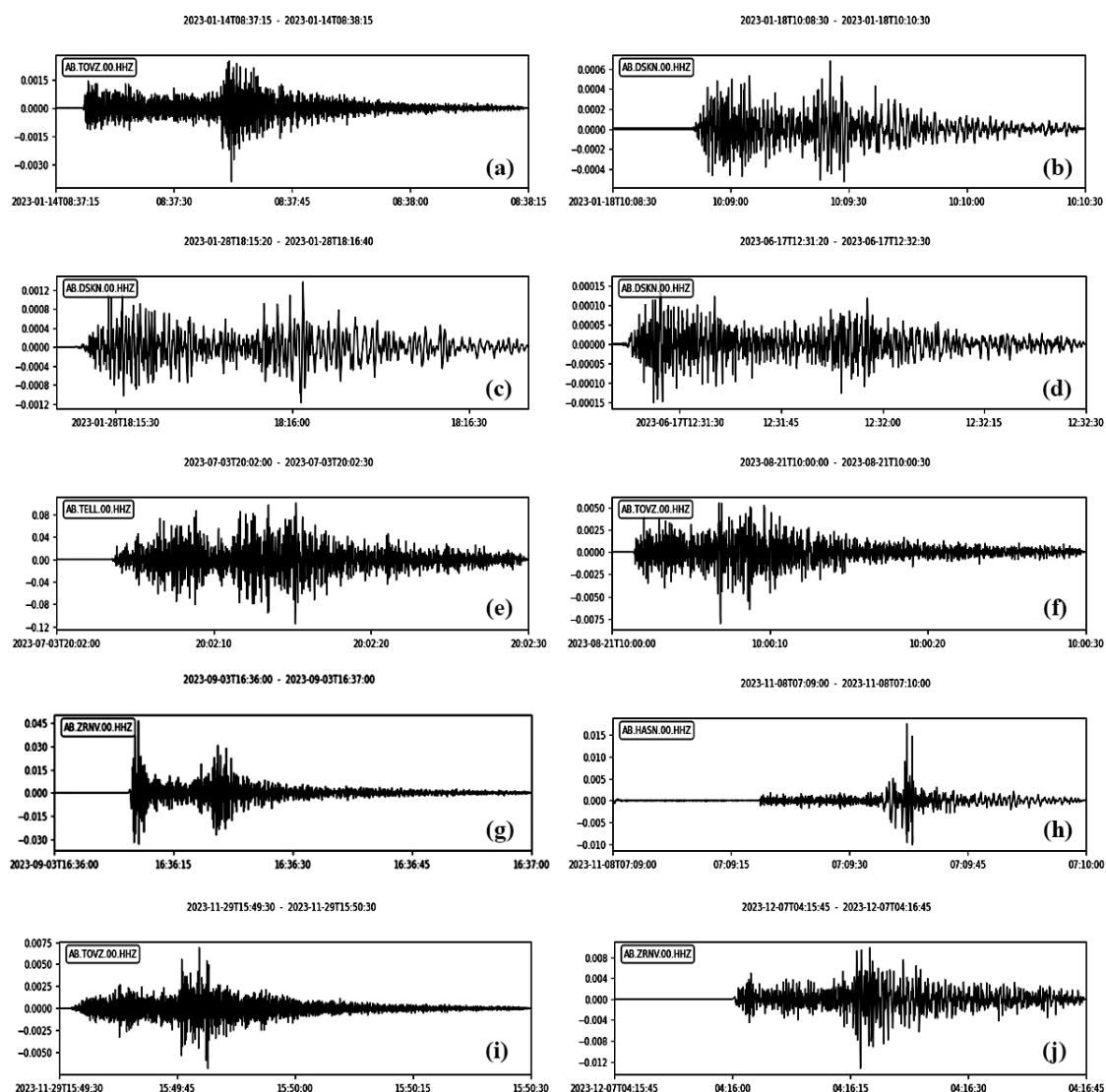


Fig. 3. Acceleration records of the earthquakes occurred in Azerbaijan and neighbor regions in 2023 (IRIS, n.d.; dates and magnitudes of the given earthquakes have been obtained from RCSS); (a) 14.01.2023 M_L 4.4 in Georgia-Azerbaijan border, (b) 18.01.2023 M_L 6.0 in Khoy city of Iran, (c) 28.01.2023 M_L 6.1 in Khoy city of Iran, (d) 17.06.2023 M_L 5.1 in Khoy city of Iran, (e) 03.07.2023 M_L 5.6 in Caspian Sea (Khachmaz), (f) 21.08.2023 M_L 4.1 in Armenia, (g) 03.09.2023 M_L 5.2 in Kurdamir, (h) 08.11.2023 M_L 4.7 in Azerbaijan-Iran border, (i) 29.11.2023 M_L 4.5 in Mingachevir, (j) 07.12.2023 M_L 5.6 in Caspian Sea (Altiaghac).

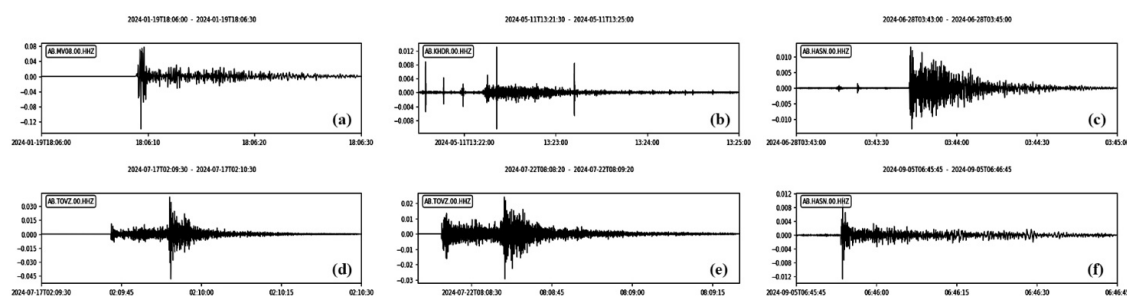


Fig. 4. Acceleration records of the earthquakes occurred in Azerbaijan and neighbour regions in 2024 (IRIS, n.d.; dates and magnitudes of the given earthquakes have been obtained from RCSS); (a) 19.01.2024 MI 5.1 in Saatli-Sabirabad regions' border, (b) 11.05.2024 MI 5.3 and MI 4.4 in Lenkeran, (c) 28.06.2024 MI 5.0 in Lerik, (d) 17.07.2024 MI 4.8 in Georgia (close to the border with Azerbaijan Balaken region), (e) 22.07.2024 17.07.2024 MI 4.9 in Georgia (close to the border with Azerbaijan Balaken region), (f) 05.09.2024 MI 4.5 in Bilesuvar

The selected earthquakes shown in figs 2, 3, 4 have the local magnitude $M_l \geq 4.1$. In 2023, we observe relatively active behavior in Iran (Khoys city), in the shores of the Gusar-Shabran megazone with relatively high magnitudes ($M_l \geq 5.1$). In 2024, we observe activity in Lower Kur depression and Talish mountains. It is important to note that in 11.05.2024 two shocks of earthquake occurred in Lankaran with M_l 5.3 and M_l 4.4 with ~ 1.5 minutes pause (fig. 4b). Also, In July we observe two shocks of M_l 4.8 and M_l 4.9 in the territory of Georgia very close to Balaken region of Azerbaijan almost in the same place (figs 2, 4d, 4e). This region is tectonically included to Middle Kur depression (fig. 1).

Methods and Materials

Catalog

Seismicity analysis can be conducted using various catalog-based methods, such as statistical estimation of the a- and b-parameters of the Gutenberg-Richter law [Gutenberg, Richter, 1956], analysis of temporal and spatial b-value variations, and estimation of maximum magnitude uncertainty. These methods are collectively referred to as seismicity indicators, which are used to characterize the seismicity level [Omami, Hashemi, 2024].

For this study, the selection of a catalog has been done from International Seismological Centre. The catalog has been downloaded from the website of the ISC Bulletin with 22,239 events [Storchak et al., 2020]. The catalog has been passed through some filtration steps in order to get ready for the research. The events with unknown magnitude types and depths have been removed. The events with magnitude type "M" and "Mn" have been removed, since we regarded them as unknown types. Events with depth of 0 km have been removed since we supposed that these were the events for which the depth could not be estimated. The events $M \geq 3$ and h (depth) ≥ 5 km are used for this study. The catalog contains the earthquakes from 1926 to 2022, since the data on or after 2022/09/01 have not been reviewed by the ISC. The earthquakes located in latitudinal range $Lat < 36^\circ$ and $Lat > 43.5^\circ$ have been removed in order to sustain the research in Azerbaijan and very close regions. Finally, we converted all the magnitude types to a uniform format using related equations. At the end, we remained with the 3,916 events with moment magnitudes (fig. 5). The relations for the conversion of different magnitude types to a moment magnitude is taken from [Zare et al., 2014]. The relations are shown in equation (1):

$$\begin{aligned}
 M_b, M_w : \quad M_w &= 0.87M_b + 0.83 \\
 M_s, M_w : \quad M_w &= 0.66M_s + 2.11, \quad \text{if } 2.8 \leq M_s \leq 6.1 \\
 \& \quad M_w &= 0.93M_s + 0.45, \quad \text{if } 6.2 \leq M_s \leq 8.2 \\
 M_l/M_d, M_w : \quad M_w &= 1.01M_l/M_d - 0.05
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

* *Local (M_l) and duration (M_d) types are converted with the same equation [Sawires et al., 2023].*

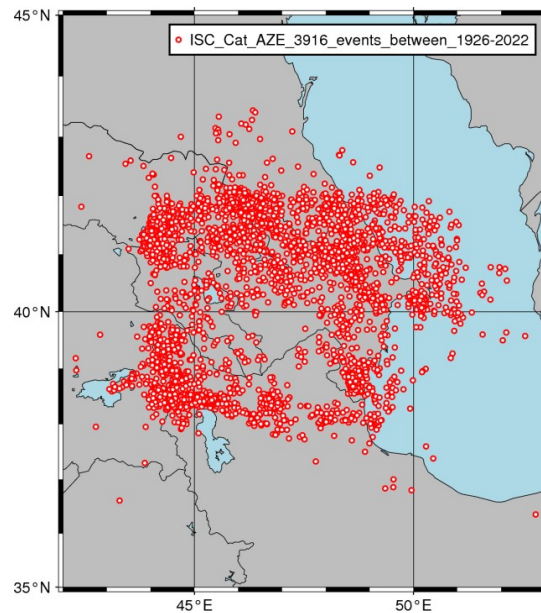


Fig. 5. Epicentral distribution of the 3916 events from the catalog between 1926-2022

The next step for the research is to divide the catalog into the clusters. We clustered the events into 6 segments according to their location in the tectonic megazones of Azerbaijan (table 2, fig. 6). The catalog has been clustered in a manual way using ArcGIS 10.7 (ESRI, 2017) software. Using the georeferencing method fig. 1 was located into the coordinates and the epicenters clustered according the tectonic megazones of Azerbaijan proposed by Alizadeh et al. [2016]. During the clustering 3 events have been lost and the whole catalog has been left with 3913 events.

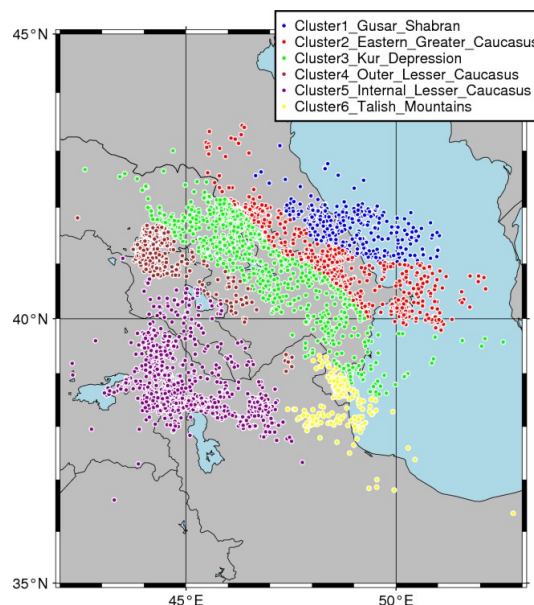


Fig. 6. Six clusters from earthquake catalogue according to the tectonic megazones of Azerbaijan

Table 2

Clusters appropriated to the tectonic megazones

Cluster	I	II	III	IV	V	VI
Tectonic MZ	G-S and aquatory	Eastern GC and aquatory	Kur Depression and aquatory	Outer LC	Internal LC	Talish Mts and aquatory

* **MZ** – Megazone, **G-S** – Gusar-Shabran, **GC** – Greater Caucasus, **LC** – Lesser Caucasus, **Mts** – Mountains

Upon catalog completion, the following seismicity indicators were assessed for each cluster: the a - and b -parameters of the Gutenberg-Richter (G-R) law, the completeness magnitude (M_c), the maximum magnitude up to which the G-R law applies ($M_{\max}$), the number of earthquakes with $M \geq M_c$ (N), and the maximum magnitude uncertainty (ΔM).

G-R law is a linear relation (2) presenting frequency-magnitude distribution [Gutenberg, Richter, 1956]:

$$\log N = a - bM \quad \text{or} \quad N = 10^{a-bM} \quad (2)$$

where N – is the number of earthquakes greater than and equal to magnitude M , a - and b - are real constants.

a - and b -values are important parameters characterizing the seismic features. a -value characterizes the seismic activity, while b -value shows the relation of large to small quakes [Gutenberg, Richter, 1956].

b -value is the slope of the linear G-R relation and a -value is the intersection of this linearity with logarithm of cumulative distribution of earthquakes [Popandopoulos, 2018].

The b -value can be estimated by plotting the linear regression of the cumulative frequency-magnitude distribution for a catalog. In fig. 8, the cumulative number of earthquakes with magnitudes $M \geq M_c$ (where N is the cumulative number of events, and M_c is the magnitude of completeness) is plotted against magnitude for each cluster. We defined M_c as the magnitude of completeness, $M_{\max}$ as the maximum magnitude up to which the linear fit applies, and the magnitude bin as the interval used for grouping magnitudes in the cumulative distribution plot [Godano et al., 2014; Papadopoulos, 2018]. For this study, we set the bin size to 0.1.

As a result of linear fitting, a -value is deduced from the G-R relation as follows (3):

$$a = \log N + bM_c, \quad M \geq M_c \quad (3)$$

Using a - and b -values, we can find out the number of earthquakes in the catalog with magnitudes $M \geq M_c$.

ΔM – Maximum magnitude uncertainty, is proposed by Ommi, Hashemi [2024] as one of the seismic indicators. In this study we estimated ΔM for each cluster using the equation below (4):

$$\Delta M = M_{\max}^{\text{obs}} - M_{\max}^{\text{exp}} \quad (4)$$

where $M_{\max}^{\text{obs}}$ is maximum observed magnitude in the catalog and $M_{\max}^{\text{exp}}$ is the expected maximum magnitude which is estimated as follows: $\frac{a}{b}$.

Results and Discussion

Fig. 7 illustrates the G-R law representation of each cluster for defined M_c , M_{max} and bin.

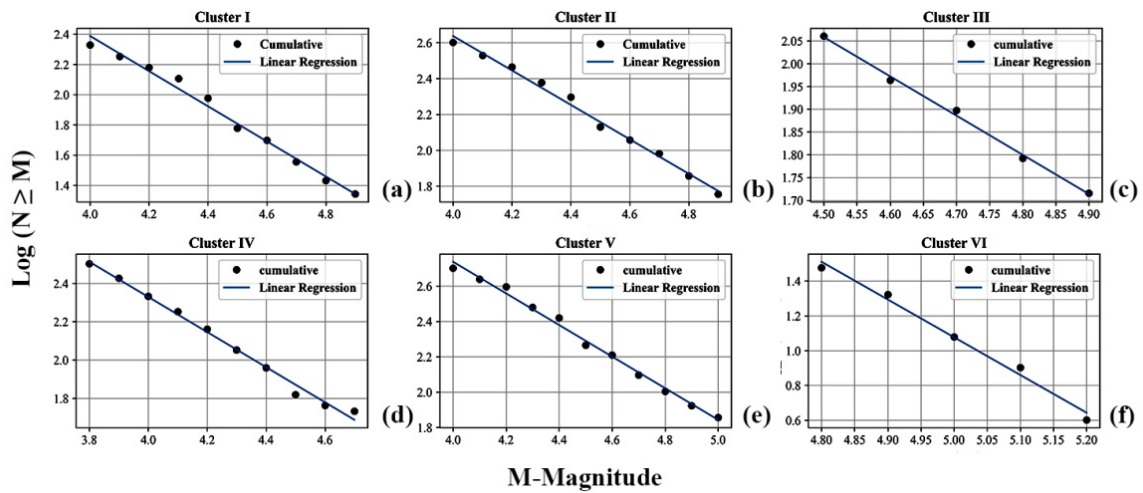


Fig. 7. Linear G-R relation and the logarithm of the cumulative number of earthquakes with magnitudes $M \geq M_c$. Clusters (a) I, (b) II, (c) III, (d) IV, (e) V, (f) VI

The estimated seismicity indicators; M_c , M_{max} , a - and b -values and $N (M \geq M_c)$ for each cluster have been shown in table 3 and the trends of them have been illustrated in figs 8 and 9.

Table 3

Seismicity indicator estimations for each cluster

Cluster	M_c	M_{max}	a -value	b -value	$N (M \geq M_c)$
I	4	5	6.97	1.16	213
II	4	5	6.44	0.96	399
III	4.5	5	5.93	0.86	115
IV	3.8	4.7	5.99	0.92	318
V	4	5.1	6.28	0.89	503
VI	4.8	5.2	11.89	2.17	30

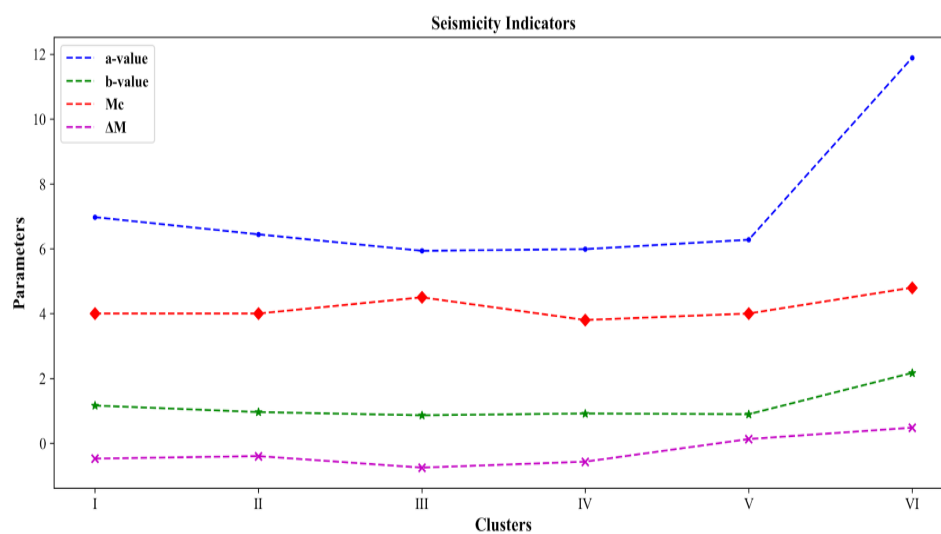


Fig. 8. Seismicity Indicators

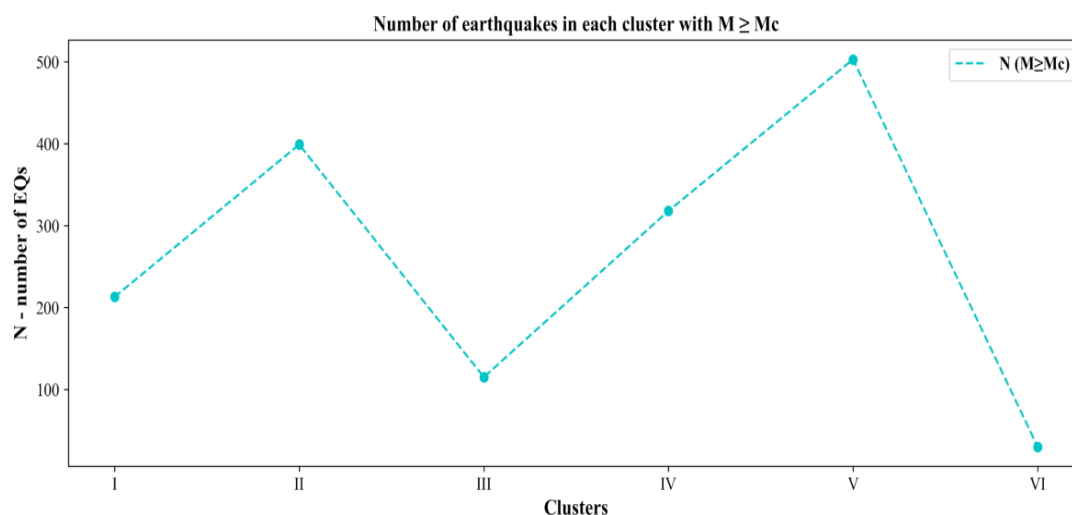


Fig. 9. Number of earthquakes in each cluster with $M \geq M_c$

We observe relatively high b -values in clusters I and VI (1.16 and 2.17 respectively), while the other clusters have $b < 1$. b -value is an indicator of the dynamics of the tectonic regime in the study area and decrease of b -value is implied as higher stress in the region [Popandopoulos, 2018]. To clearly observe this relation, Babayev T. et al. [2023] study can be viewed which shows the temporal variation of b -value for the Kahramanmaraş region after the disastrous 6th February, 2023 earthquake till May 2023. From the study, it is obviously seen that b -value increased, while the number of earthquakes decreased during February – May, 2023 period which can be interpreted as the stress level decreased after the disastrous earthquake during several months [Babayev et al., 2023]. Low b -value signs for the compression zone, whereas the higher b -value signs for the extension zone [Popandopoulos, 2018]. Therefore, temporal variation of b -value can be useful in earthquake predictions. Based on Popandopoulos (2018), in 75% cases in several regions over the world, temporal anomalies in the value of b were observed before strong earthquakes with magnitudes higher than 5. Moreover, it is stated that time variations of b -value have reverse proportionality with V_p and V_p/V_s (V_p – P-wave velocity, V_s – S-wave velocity) which means that V_p and V_p/V_s increase in lower b -value [Popandopoulos, 2018].

Generally, for the whole Earth, b -value is supposed to be around 1 [El-Isa, Eaton, 2014]. Meanwhile, it can vary above and under 1. b -values of clusters II and IV are the closest to 1, 0.96 and 0.92 respectively. Moreover, the clusters have close b -values, except cluster VI, 2.17. During the estimation of b -value for the cluster VI, we firstly defined M_c as 3.5 and M_{max} as 4.4. According to the maximum magnitude uncertainty, we explored that b -value estimated with M_c as 3.5 and M_{max} as 4.4 is wrong which was 0.34 (a -value: 3.29). We decided to set M_c as 4.8 and M_{max} as 5.2 and got b -value 2.17 (a -value: 11.89). We will mention about this issue when we discuss the maximum magnitude uncertainty.

Meanwhile, we observe close values of a -value among the clusters. Exceptionally, Cluster VI has the highest value which is 11.89. a -value helps to rate the seismicity [Anbazhagan et al., 2015]. By a - and b - values, we can imply the number of earthquakes with the magnitudes above the M_c with the equation (2). We observe the highest a - and b -values and lowest N – the number of the earthquakes in cluster VI (table 3). Fig. 8 illustrates that the clusters have almost the linear trend of completeness of magnitude. Thus, magnitude of completeness for each is ≥ 4 (M_c -IV = 3.8). We noted that b -value represents the relation of large to small earthquakes. In Cluster VI, which has the highest magnitude of completeness and have 30 earthquakes with magnitude above 4.8, which

can be seen as a high seismic hazard level in terms of magnitude (figs 8, 9), while in the other clusters more events with smaller magnitudes are observed.

Table 4 shows ΔM for each cluster.

Table 4

ΔM for the clusters

Cluster	I	II	III	IV	V	VI
ΔM	-0.47	-0.40	-0.75	-0.57	0.13	0.48

Minus sign shows that expected maximum magnitude is greater than observed maximum magnitude. As seen from the values, ΔM for all clusters is close to zero ($-1 < \Delta M_{(I, II, III, IV, V, VI)} < 1$). Closer ΔM to 0 means closer maximum observed and expected magnitudes, which means that expected magnitude estimation is in the acceptable level of accuracy. Back to the estimation of the a - and b -values of Cluster VI, as noted, we first defined M_c as 3.5 and M_{max} as 4.4 for Cluster VI, by which a - and b -values were obtained 3.29 and 0.35 respectively. Using these values, the expected maximum magnitude and thus, ΔM was estimated for Cluster VI. We obtained $\Delta M = -3.55$ for Cluster VI which is a quite high uncertainty meaning the expected maximum magnitude (9.51) is very higher than observed maximum magnitude (5.96). As the expected maximum magnitude is the ratio of a to b , we deduced that estimation of a - and b -values were done incorrectly (because the uncertainty is quite high). Therefore, we re-defined the range between completeness and maximum magnitudes where the G-R linearity fitting is sustained.

A comparison of our estimated seismicity parameters with previous studies reveals consistency in b -value trends while highlighting key methodological differences. Babayev G. et al. [2020] reported a spatial variation in b -values ranging from 0.5 to 1.1 for the Eastern Greater Caucasus slope. For the same region, our study estimates a single b -value of 0.96. According to Babayev G. et al. [2020], b -values exceed 0.85 in the northern parts of the slope, whereas the majority of the region exhibits lower values (0.5–0.7), indicative of subduction or compressional stress exerted by the Kur Depression from the south—an observation supported by other studies, including Babayev, Aliyev [2019].

Another relevant study by Ahadov, Ozturk [2021] provides a broader-scale assessment, estimating b -values across the Eastern Mediterranean and Caucasus region, including Azerbaijan. For Azerbaijan specifically, they report b -values of approximately 0.8 for the Kur Depression and Eastern Greater Caucasus (corresponding to Clusters I, II, and III in our study) and 1.0–1.3 for the Lesser Caucasus and Talysh regions (Clusters IV, V, and VI). These values reinforce the compressional influence of the Kur Depression and Eastern Greater Caucasus by the Lesser Caucasus and Talysh regions, aligning with previous studies and our findings. However, the b -values obtained by Ahadov, Ozturk [2021] are generally lower than those reported in our study, primarily due to differences in the definition of magnitude of completeness (M_c).

To clarify this discrepancy, we recall that the b -value represents the relative occurrence of strong versus weak earthquakes [Gutenberg, Richter, 1956]. In our study, the completeness magnitudes for Clusters I, II, III, IV, V, and VI are 4.0, 4.0, 4.5, 3.8, 4.0, and 4.8, respectively. This indicates that our b -value estimates are derived from moderate to large earthquakes. In contrast, Ahadov, Ozturk [2021] define lower completeness magnitudes (~ 3.0 – 3.3), thus incorporating a greater proportion of smaller earthquakes into their analysis. For example, Cluster VI in our study, which has the highest completeness magnitude ($M_c=4.8$), also exhibits the highest b -value (2.17). This distinction highlights

the difference in scope: our study focuses on moderate to large earthquakes, whereas Ahadov, Ozturk [2021] consider both small and large events.

Despite these differences, our results remain consistent with global seismicity trends. The b -values for individual clusters, as well as the overall average ($b_{\text{avg}} \approx 1.16$), generally cluster around 1.0 (except for Cluster VI), which aligns with the findings of El-Isa, Eaton [2014]. Furthermore, to our knowledge, no prior studies have reported a -value estimates for Azerbaijan. Additionally, we introduce the concept of maximum magnitude uncertainty, adapted from Omimi, Hashemi [2024], to assess the reliability of our a - and b -value estimations. This parameter has not been previously estimated for Azerbaijan, making our contribution a novel addition to the region's seismicity analysis.

Conclusion

In this study, we presented review of modern seismic regime of Azerbaijan in terms of seismicity indicators. We conducted international catalogue-based analysis and made an insight to the dynamics of Azerbaijan from 1926 to 2022 in terms of seismicity indicators. The catalogue has been clustered relevantly to the tectonic megazones of Azerbaijan region. We observe that the clusters have almost the linear trend of completeness of magnitude. Thus, magnitude of completeness for each is ≥ 4 ($M_c\text{-IV} = 3.8$). We have seen the number of earthquakes in each cluster with magnitude greater than and equal to magnitude of completeness. That means, using the clustering approach, we conceived the seismic activity in respective tectonic segments in terms of the number of earthquakes with magnitude greater than at least 3.8. We conclude that the clusters I-V are active in terms of the events with smaller magnitudes and higher number of occurrences (relatively less b -value), while cluster VI is active or hazardous in terms of the events with higher magnitudes and lesser number of occurrences (relatively higher b -value).

References

1. Ashurbeyli S.B., Bakuvi A.R. Azerbaijani scientist-geographer of the early 15th century. News of the Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR. Series of Social Sciences. 1958. No. 5. pp. 17–22. (In Russ.)
2. Azizbekov S.A. Tectonic structure of Azerbaijan and the Caspian depression. In: International geophysical congress, tectonic maps of Europe and the world. Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR. Department of Earth Sciences. Baku. 1968. 4 p. (In Russ.)
3. Babayev G.R., Agayeva S.T. Strong earthquakes in Azerbaijan for historical and contemporary periods (conceptual review). *Geofizicheskiy Zhurnal*. 2021. Vol. 43. No. 3. pp. 106–122. DOI: 10.24028/gzh.v43i3.236383. (In Russ.)
4. Khain V.E. Tectonics of continents and oceans (year 2000). Moscow. Nauchniy mir. 2001. 606 p. (In Russ.)
5. Popandopoulos G.A. Detailed studies of temporal variations of the b -value parameter of the Gutenberg-Richter law based on high-precision seismic observations data at the Garm polygon in Tajikistan. *Journal of Physics of the Solid Earth*. 2018. No. 4. pp. 79–99. (In Russ.)
6. Weber V.N. Shemakha earthquake of January 31, 1902. Proceedings of the Geological Committee. St. Petersburg. Type. M. Stasiulevich. 1903. 73 p. (In Russ.)
7. Zonenshain L.P., Savostin L.A. Introduction to geodynamics. Moscow. Nedra. 1979. 311 p. (In Russ.)
8. Ahadov B., Ozturk S. Spatial variations of b -value and fundamental parameters of the earthquake occurrences in the Eastern Mediterranean and Caucasus. *Natural Hazards*. 2021. 40 p. DOI: 10.21203/rs.3.rs-321644/v1.
9. Aktug B., Parmaksiz E., Kurt M., Lenk O., Kilichoglu A., Gurdal M., Ozdemir S. Deformation of Central Anatolia: GPS implications. *Journal of Geodynamics*. 2013. Vol. 67. pp. 78–96. DOI: 10.1016/j.jog.2012.05.008.

10. Aktug B., Nocquet J., Cingoz A., Parsons B., Erkan Y., England P., Lenk O., Gurdal M., Kilichoglu A., Akdeniz H., Tekgul A. Deformation of western Turkey from a combination of permanent and campaign GPS data: limits to block-like behaviour. *Journal of Geophysical Research Atmospheres. Solid Earth*. 2009. Vol. 114. Issue B10. DOI: 10.1029/2008JB006000.
11. Alizadeh A., Guliyev I., Kadirov F., Eppelbaum L. *Geosciences of Azerbaijan*. Vol. I: *Geology*. Chap. 2: *Geomorphology*. 2016. pp. 11–29. DOI: 10.1007/978-3-319-27395-2.
12. Anbazhagan P., Bajaj K., Patel S. Seismic hazard maps and spectrum for Patna considering region-specific seismotectonic parameters. *Natural Hazards*. 2015. Vol. 78. No. 2. pp. 1163–1195. DOI: 10.1007/s11069-015-1764-0.
13. Babayev G., Aliyev M. Seismic b-value study in southern slope of Greater Caucasus (Azerbaijan). In: *Proceedings of the 2nd International Electronic conference on geosciences*. 2019. 1 p. MDPI. Basel. Switzerland. DOI: 10.3390/IECG2019-06227.
14. Babayev G., Telesca L., Agayeva S., Ismail-zade T., Muradi I., Aliyev Y., Aliyev M. Seismic hazard analysis for southern slope of the Greater Caucasus (Azerbaijan). *Pure and Applied Geophysics*. 2020. Vol. 177. Issue 8. pp. 3747–3760. DOI: 10.1007/s00024-020-02478-0.
15. Babayev T., Aliyev Y., Muradi I., Aliyev M. Post-seismic activity review of 06.02.23 Kahramanmaraş Türkiye earthquake. In: *Proceedings of the 9th International scientific conference of young scientists & students. Geoinformatics, Georesources, Geoecology*. Baku. 2023. pp. 91–93.
16. Beyreuther M., Barsch R., Krischer L., Megies T., Behr Y., Wassermann J. ObsPy: A Python toolbox for seismology. *Seismological Research Letters*. 2010. Vol. 81. No. 3. pp. 530–533. DOI: 10.1785/gssrl.81.3.530.
17. El-Isa Z.H., Eaton D.W. Spatiotemporal variations in the b-value of earthquake magnitude-frequency distributions: Classification and causes. *Tectonophysics*. 2014. Vol. 615-616. pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.12.001.
18. Godano C., Lippiello E., Arcangelis de L. Variability of the b value in the Gutenberg–Richter distribution. *Geophysical Journal International*. 2014. Vol. 199. No. 3. pp. 1765–1771. DOI: 10.1093/gji/ggu359.
19. Gutenberg B., Richter C.F. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1956. Vol. 46. No. 2. 1956. pp. 105–145. DOI: 10.1785/BSSA0460020105.
20. Kadirov F., Yetirmishli G., Safarov R., Mammadov S., Kazimov I., Floyd M., Reilinger R., King R. Results from 25 years (1998–2022) of crustal deformation monitoring in Azerbaijan and adjacent territory using GPS. *ANAS Transactions Earth Sciences*. 2024. No. 1. pp. 28–43. DOI: 10.33677/ggianas20240100107.
21. Kangarli T., Mammadli T., Aliyev F., Safarov R., Kazimova S. Revelation of potentially seismic dangerous tectonic structures in a view of modern geodynamics of the Eastern Caucasus (Azerbaijan). *Earth's crust and its evolution – from Pangea to the Present Continents*. IntechOpen. 2022. DOI: 10.5772/intechopen.101274.
22. Omami S., Hashemi M. Machine learning technique in the north Zagros earthquake prediction. *Applied Computing and Geosciences*. 2024. Vol. 22. DOI: 10.1016/j.acags.2024.100163.
23. Sawires R., Peláez J., Santoyo M.A. Probabilistic seismic hazard assessment for Western Mexico. *Engineering Geology*. 2023. Vol. 313. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106959.
24. Storchak D.A., Harris J., Brown L., Lieser K., Shumba B., Di Giacomo D. Rebuild of the Bulletin of the International Seismological Centre (ISC) – part 2: 1980–2010. *Geoscience Letters*. 2020. Vol. 7. No. 1. DOI: 10.1186/s40562-020-00164-6.
25. Telesca L., Kadirov F., Yetirmishli G., Safarov R., Babayev G., Ismaylova S. Statistical analysis of the 2003–2016 seismicity of Azerbaijan and surrounding areas. *Journal of Seismology*. 2017. Vol. 21. No. 6. pp. 1467–1485. DOI: 10.1007/s10950-017-9677-x.
26. Yetirmishli G.J., Kazimov I.E. Modern GPS geodynamics of Azerbaijan. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 19–30. DOI: 10.46698/VNC.2022.35.95.002.
27. Zare M., Amini H., Yazdi P. et al. Recent developments of the Middle East catalog. *Journal of Seismology*. 2014. Vol. 18. pp. 749–772. DOI: 10.1007/s10950-014-9444-1.

УДК 553.319; 553.048

DOI: 10.46698/VNC.2025.70.10.010

Оригинальная статья

Корреляционный метод подсчета ресурсов редкоземельных элементов на Камыш-Бурунском железорудном месторождении Керченского бассейна

Ю.А. Ермаков^{id}, А.А. Самсонов^{id}, В.И. Старостин^{id},
И.П. Мамаев^{id}, В.Д. Шалимов^{id}

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Геологический
факультет, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1,
e-mail: killpor@ya.ru, samsonov@geol.msu.ru, vistar.geol@gmail.com,
giger3612@gmail.com, shalimov911@mail.ru

Статья поступила: 30.07.2024, доработана: 10.02.2025, принята к публикации: 14.02.2025

Резюме: Актуальность работы. Редкоземельные элементы (РЗЭ) являются стратегическим дефицитным видом сырья для отечественной экономики. Помимо разведки и ввода в эксплуатацию новых месторождений редкоземельного сырья, перспективным направлением исследований является оценка уже разведанных месторождений изначально не редкоземельной специализации (в частности, законсервированных) как потенциальных источников РЗЭ. **Цель исследования.** Подсчет ресурсов редкоземельных элементов на Камыш-Бурунском железорудном месторождении с применением косвенного корреляционного метода. **Методы исследования.** В работе представлен статистический метод подсчета прогнозных ресурсов РЗЭ категории P_3 на Камыш-Бурунском месторождении Керченского железорудного бассейна. Предлагаемый метод основан на установлении прямой значимой корреляции между содержаниями основного полезного компонента (Fe) и РЗЭ по данным химического анализа отобранных проб руд. Прогнозное среднее содержание РЗЭ в рудах месторождения определялось с помощью уравнения линейной регрессии по известным средним содержаниям железа. Прогнозные ресурсы РЗЭ рассчитаны на основе данных по запасам железа и соотношения между средними содержаниями железа и РЗЭ в рудах. **Результаты.** Рассчитано среднее содержание РЗЭ на Камыш-Бурунском месторождении, установлена прочная корреляционная связь содержаний РЗЭ с железом. Корреляционным методом посчитаны ресурсы РЗЭ для данного месторождения. Данный метод может быть применим для быстрой оценки и подсчета ресурсов редкоземельных элементов на других известных месторождениях изначально не редкоземельной специализации при совпадении следующих факторов: на месторождении выявлено повышенное содержание РЗЭ; на месторождении проводился подсчет запасов компонента, содержания которого потенциально могут коррелировать с содержаниями РЗЭ; месторождения обладают относительно простым геологическим строением и низким коэффициентом вариации содержаний основных компонентов; данные месторождения отработаны в незначительной степени и/или законсервированы.

Ключевые слова: редкоземельные элементы, Керченский бассейн, осадочные месторождения, подсчет ресурсов, корреляционный анализ.

Для цитирования: Ермаков Ю.А., Самсонов А.А., Старостин В.И., Мамаев И.П., Шалимов В.Д. Корреляционный метод подсчета ресурсов редкоземельных элементов на Камыш-Бурунском железорудном месторождении Керченского бассейна. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 119-131. DOI: 10.46698/VNC.2025.70.10.010

DOI: 10.46698/VNC.2025.70.10.010

Original paper

A correlation method for calculating rare earth element resources at the Kamysh-Burunsky iron ore deposit in the Kerch basin

Yu.A. Yermakov^{ID}, A.A. Samsonov^{ID}, V.I. Starostin^{ID},
I.P. Mamaev^{ID}, V.D. Shalimov^{ID}

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, 1 Leninskie Gory, 119991 Moscow,
Russian Federation,

e-mail: killpor@ya.ru, samsonov@geol.msu.ru, vistar.geol@gmail.com,
giger3612@gmail.com, shalimov911@mail.ru

Received: 30.07.2024, revised: 10.02.2025, accepted: 14.02.2025

Abstract: Relevance. Rare earth elements (REE) are a strategically scarce type of raw material for the Russian economy. In addition to the exploration and commissioning of new deposits of rare earth raw materials, a promising area of research is the assessment of already explored deposits of initially non-rare earth specialization (in particular, mothballed ones) as potential sources of REE, the purpose of the study. **Aim.** Calculation of rare earth element resources at the Kamysh-Burun iron ore deposit using an indirect correlation method. **Methods.** The paper presents a statistical method for calculating the forecast resources of the P₃ category of REE at the Kamysh-Burunskeye deposit of the Kerch iron ore basin. The proposed method is based on the establishment of a direct significant correlation between the contents of the main useful component (Fe) and REE according to the chemical analysis of the selected ore samples. The predicted average REE content in the ores of the deposit was determined using a linear regression equation based on known average iron concentrations. The projected REE resources are calculated based on data on iron reserves and the ratio between the average iron and REE contents in ores. **Results.** The average content of rare earth elements in the Kamysh-Burunskeye deposit has been calculated, and a strong correlation between the REE content and iron has been established. The REE resources for this deposit are calculated using the correlation method. This method can be used to quickly assess and calculate the resources of REE in other known deposits of initially non-rare earth specialization if the following factors coincide: an increased content of REE was detected at the deposit; reserves of a component were calculated at the deposit, the contents of which could potentially correlate with the contents of REE; deposits have a relatively simple geological structure and a low coefficient of variation in the contents. The main components; These deposits have been worked out to a minor extent and/or mothballed.

Keywords: rare earth elements, Kerch basin, sedimentary deposits, resource calculation, correlation analysis.

For citation: Yermakov Yu.A., Samsonov A.A., Starostin V.I., Mamaev I.P., Shalimov V.D. A correlation method for calculating rare earth element resources at the Kamysh-Burunsky iron ore deposit in the Kerch basin. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 119-131. DOI: 10.46698/VNC.2025.70.10.010

Введение

Редкоземельные элементы являются стратегическим видом сырья для отечественной экономики, применяющимся в различных высокотехнологичных отраслях промышленности, однако современное состояние и степень освоенности минерально-сырьевой базы страны на данный момент не покрывают внутренний спрос в достаточной мере (что позволяет считать РЗЭ дефицитным видом сырья) (Страте-

гия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года). Несмотря на то, что на Россию приходится около 1/5 мировых ресурсов РЗЭ [Авдонин и др., 2005], а на баланс поставлено 28,7 млн т суммы триоксидов редкоземельных элементов ($\sum TR_2O_3$), нынешняя доля России в мировом производстве РЗЭ – всего около 0,9% (объем товарной добычи по данным на 2022 год – 2,6 тыс. т $\sum TR_2O_3$, единственным производителем является Ловозерский ГОК в Мурманской области) [Государственный доклад ..., 2023]. На данный момент ряд месторождений РЗЭ уже находится в процессе подготовки к эксплуатации (Томторское, Партомчоррское и др.). Помимо разведки и ввода в эксплуатацию новых месторождений редкоземельного сырья, перспективным направлением исследований является оценка уже разведанных месторождений изначально не редкоземельной специализации (в частности, законсервированных) как потенциальных источников РЗЭ.

Большая часть запасов РЗЭ в России приходится на магматогенные источники (а также на развивающиеся по ним коры выветривания). Однако повышенная концентрация РЗЭ на территории страны обнаруживается также в других источниках. В частности, значительное сосредоточение РЗЭ отмечается в осадочных железорудных бассейнах Азово-Черноморской, Западно-Сибирской и некоторых других осадочных рудных провинций [Некипелова и др., 2022]. Отдельный интерес представляет Керченский железорудный бассейн, так как, помимо обнаружения там повышенных содержаний РЗЭ, месторождения бассейна имеют очень высокую степень разведанности по основным компонентам руд, а также выгодное в инфраструктурном плане местоположение. Непосредственно объектом данного исследования является Камыш-Бурунское месторождение, относящееся к южной группе месторождений Керченского бассейна (рис. 1).

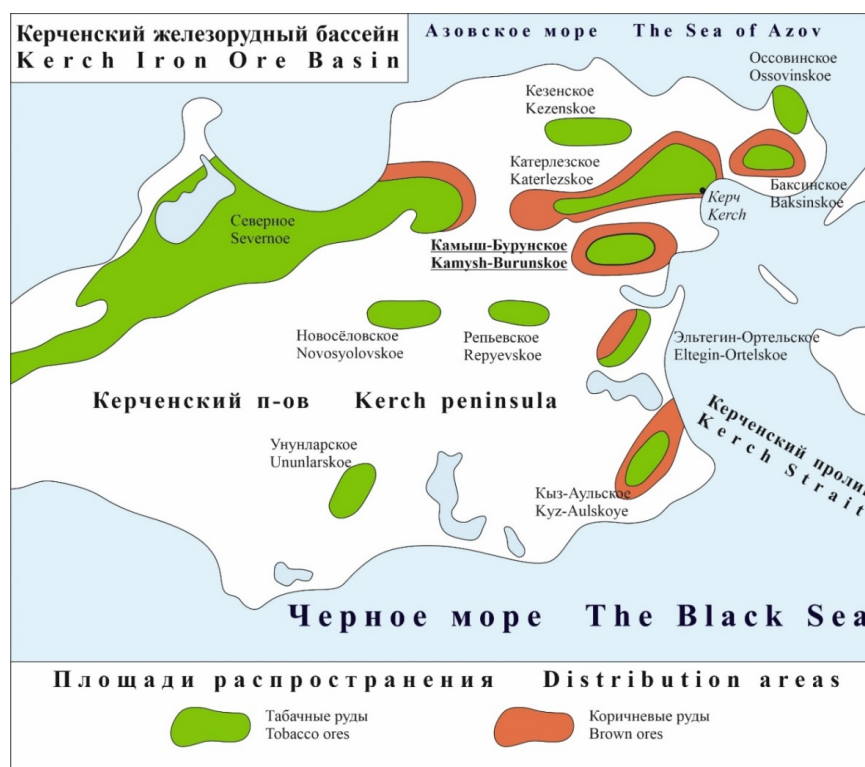


Рис. 1. Схема расположения месторождений в пределах Керченского железорудного бассейна [Григорьев, 1987] /

Fig. 1. The layout of deposits within the Kerch iron ore basin [Grigoryev, 1987]

Геологическое строение Камыш-Бурунского месторождения

Осадочные железорудные отложения Камыш-Бурунского месторождения контролируются одноименной мульдой, представляющей собой весьма пологую, шириной около 3,7 км, синклинальную складку, вытянутую в субширотном направлении на 7,5 км. Железные оолитовые руды месторождения среднекиммерийского возраста мощностью от 0 на периферии до 19,55 м в центре, имеют четкие границы как с подстилающими понтическими детритусовыми («фаленами») и мэотическими известняками, так и с перекрывающими верхнекиммерийскими пластичными бентонитовыми глинами (N_2k_3) (пьяченцкий век плиоцена по международной геохронологической шкале). Рудное тело имеет мощность до 19,55 м в центре мульды и выклинивается на ее периферии и характеризуется спокойным залеганием, от субгоризонтального в средней части до полого наклонного на крыльях, не более 5–6° (Попова В.И. и др. Геологический отчет с подсчетом запасов железных руд месторождений Южной группы Керченского бассейна, 1978).

Основные типы руд, встречающиеся на месторождениях Керченского бассейна [Холодов и др., 2012, 2014]:

1. Сидеритовые руды – наименее богатые железом (33,4% $FeO_{общ}$);
2. Табачные руды – первичные закисные оолитовые, хорошо сцементированные руды (38,4% $FeO_{общ}$);
3. Коричневые руды – представляют собой окисленные оолитовые руды, в большей степени обогащенные железом (48,1% $FeO_{общ}$);
4. Икряные руды – состоящие в основном из перемытых в прибрежных условиях псевдооолитов, наиболее обогащенных железом и, зачастую, покрытых черной коркой оксидов и гидроксидов марганца и железа (т.н. «пустынный загар») (52,3% $FeO_{общ}$).

Данная типизация осадочных руд месторождений Керченского железорудного бассейна опирается на их морфологические характеристики и в целом отражает химический состав.

На Камыш-Бурунском месторождении было проведено оконтуривание и подсчет запасов осадочных железных руд. Балансовые запасы Южной группы месторождений, в которую входит Камыш-Бурунское месторождение, обладают степенью разведанности по категории А в 80% от общего объема запасов. Балансовые запасы руды Камыш-Бурунского месторождения по категории А – 270 057 тыс. т против 326 552 тыс. т по категориям А+В+С₁ (Попова В.И. и др. Геологический отчет с подсчетом запасов железных руд месторождений Южной группы Керченского бассейна, 1978).

В ходе детальной разведки в 1947–54 гг. на Камыш-Бурунском месторождении было отобрано 8728 рядовых проб на 3 основных компонента (Fe, Mn, P). Также в 1974–1975 годах Симферопольским институтом минеральных ресурсов проведены анализы 380 проб исходных руд и продуктов их обогащения полуколичественным спектральным методом на 42 компонента: Fe, Mn, P, V, As, Ni, Co, Cr, Si, Al, Ca, Mg, K, Na, Ti, Ba, C, H, O, N, Y, F, Cl, Zn, Zr, Pb, Cu, Sr, Mo, Sn, Sb, Nb, La, Sc, Ag, Yb, W, Bi, Re, Ta, Cd, Tl. Проведенное комплексное исследование керченских руд однозначно указало на их многокомпонентный химический состав. Однако оно же выявило, что наряду с основными компонентами керченских железных руд, таки-

ми как Fe, Mn, Si, Ti, Al, P, Ca, Mg, S в значимых количествах присутствуют только V, Co, Ni (легирующие примеси) и As. Остальные элементы, в том числе и редкоземельные, присутствуют в концентрациях значительно ниже промышленных (по состоянию на 1975 год) (Попова В.И. и др. Геологический отчет с подсчетом запасов железных руд месторождений Южной группы Керченского бассейна, 1978).

Положительным аспектом химического состава руд в контексте извлечения железа или РЗЭ является относительно низкое содержание радиоактивных элементов [Некипелова и др., 2022].

Разработка месторождения шла в советское время и была прекращена в 90-е годы прошлого века, так как была признана нерентабельной (в связи с низкими содержаниями Fe, трудной обогатимостью и заметными содержаниями P и As) [Нестеровский, 2020]. В результате рудное тело месторождения частично затронуто эксплуатационными выработками (отработано около четверти объема руд). На данный момент разработаны новые методы переработки и обогащения труднообогащаемых железных руд, в частности сидеритовых [Yur'ev et al., 2020; Zhu et al., 2022].

Характер накопления РЗЭ в рудах

В рудах Керченского бассейна основная концентрация редкоземельных элементов приходится на тонкую фракцию в икряных и, в несколько меньшей степени, коричневых рудах. Содержание редких земель в табачных рудах менее значительное, а в сидеритовых – наименьшее [Некипелова и др., 2022].

Накопление РЗЭ в морских обстановках (фосфориты, ЖМК и КМК, глубоко-водные красные глины) возможно при наличии достаточного количества адсорбирующего материала и незначительном привносе терригенного материала [Дубинин, 2006]. Аналогичность обстановки накопления осадков в пределах Керченского бассейна дает основание утверждать, что основной баланс РЗЭ Керченского бассейна имеет гидрогенное происхождение и был накоплен на этапе раннего диагенетического преобразования рудных осадков главным образом на фоне процессов сорбции-десорбции. При этом, возможно, частично РЗЭ были привнесены на этапе седиментогенеза коллоидными растворами. Первичный источник РЗЭ в бассейне седиментации может иметь различную природу. Например, накопление РЗЭ в бассейне Киммерийского моря может быть связано с размывом карбонатных массивов Украинского щита, обогащенных РЗЭ (например, Новополтавского или Октябрьского) [Фролов и др., 2005]. В то же время, повышенное содержание РЗЭ в рудах может быть свидетельством того, что источником рудного вещества был субмаринный гидротермальный процесс [Rudmin et al., 2018]. Повышенные содержания РЗЭ также отмечаются в водной фазе грязевых вулканов Керченско-Таманского региона, расположенных в меловых отложениях в зоне влияния крупных разломов [Чельноков и др., 2023]. В роли сорбентов РЗЭ выступали, в первую очередь, оксиды и гидрооксиды Fe^{3+} (в меньшей степени — аналогичные соединения Mn^{4+}), а также железистые смектиты. Помимо этого РЗЭ в рудах встречаются в виде изоморфной примеси в таких минералах, как монацит ((Ce, La, Nd, Th)[PO_4]), лопарит ((Na,Ce,Ca,Sr,Th)(Ti,Nb,Fe) O_3), и других; также РЗЭ могут иметь собственную минерализацию в виде субмикронных зерен фос-

фатных минералов группы рабдофана $((Ce,La)PO_4 \cdot H_2O)$ и ксенотима (YPO_4) , секущих по трещинам железорудные оолиты [Некипелова и др., 2022]. В некоторых минералах руд Керченского бассейна отмечается относительное обогащение тяжелыми редкоземельными элементами (в частности, в вивианите) [Nekipelova et al., 2023].

Одним из факторов, определяющих повышенное содержание РЗЭ в глинистых, преимущественно железисто-сметитовых [Голубовская, 1989] рудах Керченского бассейна является, вероятно, развитие ионно-абсорбционных процессов в железистых смектитах (общая формула: $M_x(Si_{4-x}Al_x)(Fe_2^{3+})O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$), сходных с процессами той же природы в каолиновых глинистых почвах редкоземельных месторождений Юга Китая. Благодаря кристаллической структуре смектитовых глин процессы абсорбции в них, протекают более интенсивно, чем в каолиновых глинах [Sato et al., 1992; Laird, 2006].

Методы исследования

В основе работы лежит метод косвенного подсчета прогнозных ресурсов РЗЭ на основе корреляции их содержания с содержанием железа, марганца, фосфора в отобранных пробах с использованием данных отчетов прошлых лет.

На месторождениях Южной группы Керченского железорудного бассейна и, в частности, на Камыш-Бурунском месторождении существуют весомые предпосылки использования корреляционного метода оценки компонентной базы. Во-первых – это относительно простое геологическое строение, во-вторых – однородность химического состава осадочных рудных тел, в-третьих – высокая степень разведанности месторождения, которое по современным меркам считается переразведанным.

В качестве рабочего материала использовались пробы, отобранные авторами и их коллегами на Камыш-Бурунском месторождении Керченского бассейна. Для подсчетов использовались результаты анализов 14 проб (табл. 1). Штуфные пробы отбирались в выходящих на дневную поверхность обнажениях рудных пластов (преимущественно «коричневых» руд, в меньшей степени – табачных руд) в секторах А и Е заброшенного карьера. Опробование икряных руд с указанной целью авторами не проводилось по причине их плохой обнаженности в бортах заброшенного карьера. Образцы соответствуют верхним горизонтам рудного пласта. Затем пробы сокращались (с истиранием в яшменных ступках и квартованием до массы 5–10 г) и анализировались методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на оборудовании «ELEMENT 2 ThermoFinnigan», принадлежащим МГУ, с получением данных по содержанию *Fe, Mn, P, As, РЗЭ (Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu)*. Результаты анализов приведены в таблице 1.

Также использовался геологический отчет В.И. Поповой и коллег 1978 г., в котором указаны содержания ряда элементов (железа, марганца и фосфора) во всех скважинах и разведочных выработках, а также средние содержания и коэффициенты вариации этих элементов для всего месторождения.

Таблица 1 / Table 1

Содержания основных элементов (%) и РЗЭ (ppm, миллионная доля или г/т) по результатам химических анализов /
The content of the main elements (%) and REE (ppm, millionth part or g/t) based on the results of chemical analyses

	Fe, %	MnO, %	As, %	P ₂ O ₅ , %	Y, ppm	La, ppm	Ce, ppm	Pr, ppm	Nd, ppm	Sm, ppm	Eu, ppm	Gd, ppm	Tb, ppm	Dy, ppm	Ho, ppm	Er, ppm	Tm, ppm	Yb, ppm	Lu, ppm	РЗЭ, ppm
1	39,1	2,2	0,108	2,3	76	104	195	27,4	115	27,8	6,6	23,5	3,7	19,3	3,7	9,9	1,3	8,2	1,0	622,9
2	42,8	0,8	0,134	2,6	81	103	228	28,5	114	28,0	7,0	25,4	3,9	19,8	3,8	10,8	1,3	8,7	1,1	664,6
3	45,4	1,4	0,145	2,5	100	128	264	33,9	143	34,0	8,1	29,6	4,5	23,4	4,5	12,4	1,5	10,0	1,2	798,4
4	36,0	0,7	0,119	1,0	73	97	292	25,9	110	24,8	6,0	22,4	3,3	17,4	3,2	8,6	1,2	7,0	0,9	692,5
5	39,0	0,8	0,102	0,9	73	93	276	25,8	107	24,9	6,0	22,1	3,3	17,6	3,1	8,9	1,2	7,4	1,0	670,2
6	36,1	2,5	0,076	0,8	90	107	296	28,5	117	27,6	6,9	24,8	3,8	20,9	4,0	9,7	1,4	9,0	1,2	749,0
7	42,6	0,2	0,100	1,0	90	110	273	33,6	130	31,0	7,1	29,5	4,4	24,1	4,1	10,7	1,4	9,0	1,2	758,8
8	43,8	1,6	0,044	0,9	83	91	212	24,6	100	22,0	5,5	23,2	3,3	17,4	3,3	8,3	1,2	7,0	0,9	602,5
9	41,3	1,5	0,034	1,1	89	88	222	25,3	100	24,2	5,8	24,5	3,5	19,3	3,7	9,4	1,4	7,7	1,1	624,7
10	22,9	0,1	0,016	0,6	53	53	136	15,9	65	14,8	3,6	15,1	2,2	11,8	2,2	5,8	0,9	4,9	0,7	386,3
11	66,2	0,7	0,096	0,8	122	111	196	30,8	124	29,0	7,2	30,0	4,4	24,9	4,8	12,4	1,8	10,4	1,4	710,3
12	63,6	0,8	0,128	0,9	116	142	370	41,9	169	37,9	8,6	37,9	5,1	26,3	4,9	12,2	1,8	9,5	1,3	984,5
13	42,5	0,5	0,066	0,8	76	76	178	22,2	90	20,8	4,6	20,4	3,0	16,3	3,1	8,0	1,2	6,6	1,0	526,9
14	26,2	0,2	0,020	0,4	72	79	189	22,0	90	20,8	4,6	20,4	2,8	15,7	3,0	7,5	1,2	6,3	0,9	535,0
Ср./ cf. m	42,0	1,0	0,1	1,2	85,4	98,7	237,7	27,6	112,6	26,2	6,3	24,9	3,7	19,6	3,7	9,6	1,3	8,0	1,1	666,4

Результаты исследования

Согласно полученным данным, содержание РЗЭ в пробах выше в 3–6 раз их кларковых значений. Среднее содержание суммы редких земель по пробам – 666 г/т. Нормирование средних содержаний РЗЭ в пробах (на PAAS – «постархейский австралийский референтный сланец») [Тейлор, Мак-Леннан, 1988] и построение спайдер-диаграммы (рис. 2) демонстрируют, что наибольшее относительное обогащение приходится на элементы от неодима до диспрозия (элементы, переходные от легких РЗЭ к тяжелым), с особенно выраженным пиком по европию. Одним из объяснений значительно повышенных содержаний европия может быть участие гидротермального процесса в привносе РЗЭ в бассейн седиментации [Дубинин, 2006].

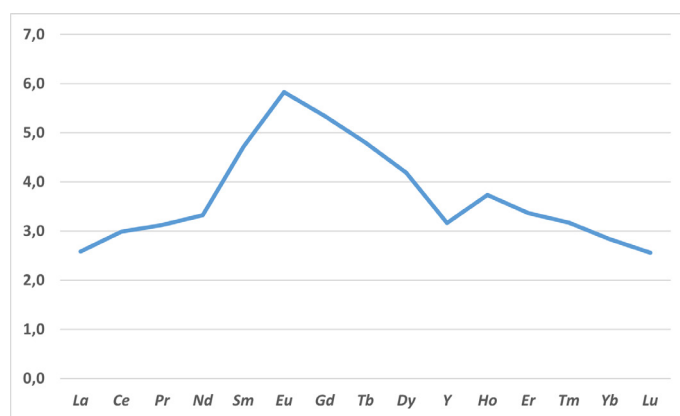


Рис. 2. Спайдер-диаграмма нормированных средних содержаний РЗЭ по пробам /
Fig. 2. Spider diagram of normalized average REE contents by samples

Коэффициент вариации для суммы редких земель составил 18,7% (весьма равномерное распределение). Далее приведены рассчитанные авторами / В.И. Поповой (по длинной и короткой осям мульд) коэффициенты вариации (дисперсии) для некоторых основных и примесных компонентов руд:

- железо – 19% / 18-22%,
- марганец – 179% / 130-229%,
- фосфор – 91% / 37-43%.

Полученные авторами результаты оказались близки к результатам В.И. Поповой. Исключением является фосфор, коэффициент вариации которого оказался существенно выше. При этом другими исследователями была выявлена прочная положительная связь содержаний фосфора с железом (коэффициент корреляции 0,75) [Sokol et al., 2022], в то время как по нашим пробам значительная корреляция не установлена.

Проверка наличия прямой или обратной корреляции и построение линейных диаграмм зависимостей по разным РЗЭ с железом, марганцем, фосфором и мышьяком дала следующие результаты (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Коэффициент корреляции основных элементов с РЗЭ /
Correlation coefficient of the main elements with REE

Железо / Iron	0,71
Марганец / Manganese	0,24
Фосфор / Phosphorus	0,29

Значение $K_{\text{кор}}$ 0,7-0,9 считается высокой корреляцией (0,5-0,7 – средняя; 0,2-0,5 – слабая). Уравнение регрессии суммы РЗЭ с железом (рис. 3) имеет хорошую прямую корреляцию (0,71 и 0,73 соответственно). Связь между церием и железом – слабая (0,42); а для остальных РЗЭ – высокая (в диапазоне 0,72-0,91). Корреляция содержания РЗЭ с фосфором и марганцем в наших пробах отсутствует.

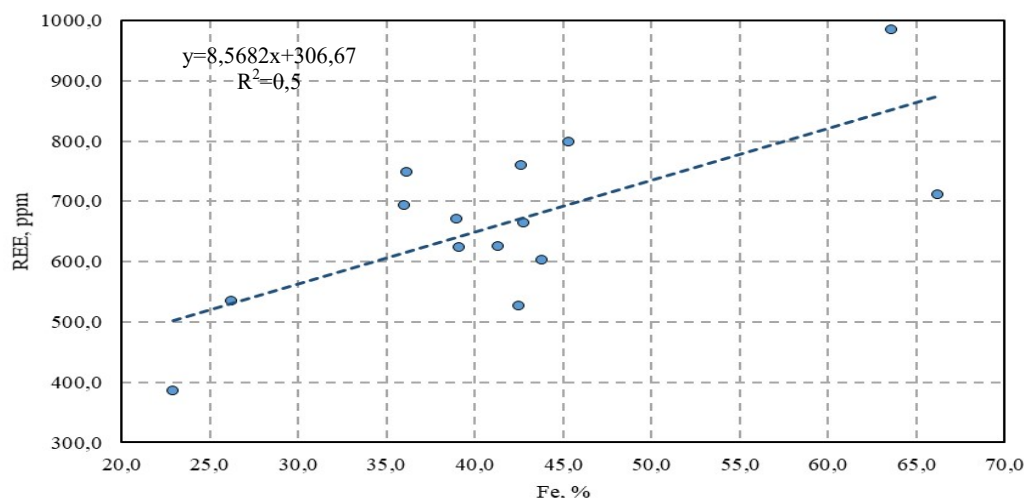


Рис. 3. График зависимости РЗЭ от железа /

Fig. 3. Graph of REE dependence on iron

Среднее содержание железа по нашим пробам $C_{Fe} = 42\%$. Согласно данным В.И. Поповой, среднее содержание железа по всем категориям всех блоков руд $C_{Fe} = 39,3\%$. Большее значение по нашим пробам объясняется тем, что пробы отбирались в основном из горизонта коричневых руд. Запасы приняты как $Q_{Fe} = 239$ млн т железной руды (сумма балансовых запасов по категориям А, В и C_1 за вычетом отработанных руд, указанных в паспорте месторождения, составленного в 1983 г.).

Рассчитанное среднее содержание суммы РЗЭ по собранным авторами пробам $C_{REE} = 666$ г/т (среднее содержание суммы легких редкоземельных элементов – 509 г/т, что типично для морских обстановок накопления РЗЭ). Пользуясь формулой уравнения регрессии из полученного графика:

$$y = 8,568 \cdot x + 306,67, \quad (1)$$

(где y – содержание РЗЭ, x – содержание железа), можно рассчитать среднее содержание РЗЭ для всего объема руды, т.к. из отчета В.И. Поповой известно среднее содержание железа по объему.

Полученное среднее содержание суммы РЗЭ по всему месторождению $C_{REE} = 643$ г/т. Для сравнения, средние содержания РЗЭ в других осадочных источниках: в каолиновых корах выветривания – 1025 г/т, в абиссальных железомарганцевых конкрециях – 2272 г/т, в морских фосфоритах – 771 г/т, в глубоководных красных глинах – 740 г/т [Невесская и др., 2003]. Сопоставлением полученного среднего содержания РЗЭ по месторождению и запасов железных руд Q_{Fe} были получены потенциальные ресурсы суммы РЗЭ $Q_{REE} = 154$ тыс. т по категории P_2 (табл. 3). Мировые запасы оцениваются примерно в 106 млн т на 2022 год в пересчете на сумму триоксидов РЗЭ [Государственный доклад ..., 2023].

Таблица 3 / Table 3

**Характеристика подсчитанных потенциальных ресурсов РЗЭ /
Characteristics of the calculated potential REE resources**

	Y	La	Ce	ΣLREE	ΣHREE	ΣREE
Ср. сод РЗЭ при 39,3 % Fe, г/т. / Cf. REE content at 39.3 % Fe, g/t.	82,4	95,3	229,5	491,5	151,9	643,0
Ресурсы РЗЭ на 239 млн т железной руды, тыс. т / REE resources for 239 million tons of iron ore, thousand tons	20,0	23,0	55,0	117,5	36,3	153,7

Можно предположить, что устойчивая корреляция редкоземельных элементов с железом, связана, главным образом, с сорбцией редкоземельных элементов на (окси)гидроксидах *Fe*.

В целом, возможность получения редкоземельных элементов из различных нетрадиционных источников изучается давно (в частности, предложена технология извлечения РЗЭ из хвостов железорудных месторождений гидрометаллургическим методом) [Peiravi et al., 2020]. Применительно к рудам Керченского бассейна, для извлечения РЗЭ предложено несколько различных технологий (простое выщелачивание, выщелачивание с биогенной дефосфоризацией и др.) [Некипелова и др., 2022]. Потенциально возможно извлекать РЗЭ из сидеритовых руд.

Выводы

Содержание и характер распределения РЗЭ в морских железистых осадках сложного фазового состава Керченского бассейна являются результатом действия трех главных процессов: (1) аккумуляция аллотигенных (детритовых) РЗЭ-содержащих минералов, (2) упомянутая выше сорбция редкоземельных элементов на *Fe*(*Mn*)-(окси)гидроксидах и, частично, на глинистом веществе и (3) привнос аутигенных минералов (фосфатов) РЗЭ в ходе диагенеза осадка.

Полученные приблизительные данные по ресурсам РЗЭ на Камыш-Бурунском месторождении Керченского железорудного бассейна (которое имеет высокую степень разведанности, а также выгодное в логистическом плане местоположение) могут служить подтверждением его потенциальной ценности в роли источника редкоземельного сырья дополнительного к традиционным.

Практическое подтверждение полученных авторами результатов может указать на возможность применения данного метода косвенного подсчета ресурсов РЗЭ и для других аналогичных месторождений Азово-Черноморской или Западно-Сибирской железорудных провинций нашей страны (в случае их достаточной разведанности) при совпадении следующих факторов: на месторождении выявлено повышенное содержание РЗЭ; на месторождении проводился подсчет запасов компонента, содержания которого потенциально могут коррелировать с содержаниями РЗЭ; месторождения обладают относительно простым геологическим строением и низким коэффициентом вариации содержаний основных компонентов; данные месторождения отработаны в незначительной степени и/или законсервированы.

Литература

1. Авдонин В.В., Бойцов В.Е., Григорьев В.М., Семинский Ж.В., Солодов Н.А., Старостин В.И. Месторождения металлических полезных ископаемых. М.: Трикта, 2005. – 720 с.
2. Голубовская Е.В. Геоминералогия керченских железорудных месторождений: дис. канд. геол.-минер. наук: 04.00.21 / Голубовская Елена Викторовна. – М.: ГИН РАН, 1989. – 232 с.
3. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году». / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. М.: Роснедра, 2023. – 640 с.
4. Григорьев В.М. Керченский железорудный бассейн. // Горная энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1987. – 592 с.
5. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в Океане. М.: Наука, 2006. – 360 с.
6. Невеская Л.А., Гончарова И.А., Ильина Л.Б., Парамонова Н.П., Хондкариан С.О. О стратиграфической шкале неогена восточного Паратетиса. // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2003. – Т. 11. № 2. – С. 3–26.
7. Некипелова А.В., Сокол Э.В., Кох С.Н., Филиппова К.А. Керченские осадочные железные руды – нетрадиционный источник Nd и MREE: особенности и перспективы. // Руды и металлы. – 2022. – № 1. – С. 106–120.
8. Нестеровский В.А. Уникальный промышленно-генетический тип осадочных месторождений. // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2020. – Т. 16. № 1. – С. 54–68.
9. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. / Пер. с англ. Р.Н. Соболева, Л.Т. Соболевой, ред. Л.С. Бородин. – М.: Мир, 1988. – 381 с.
10. Фролов А.А., Лапин А.В., Толстов А.В., Зинчук Н.Н., Белов С.В., Бурмистров А.А. Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минерагения, прогноз). М.: НИИ-Природа, 2005. – 540 с.
11. Холодов В.Н., Голубовская Е.В., Недумов Р.И. Киммерийская железорудная провинция причерноморья, условия ее формирования и перспективы. // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2014. – № 3. – С. 5–35.
12. Холодов В.Н., Недумов Р.И., Голубовская Е.В. Фациальные типы осадочных железорудных месторождений и их геохимические особенности. // Литология и полезные ископаемые. – 2012. – № 6. – С. 503–531.
13. Челноков Г., Харитонов Н.А., Лаврушин В., Айдаркожина А.С., Женг Г. Редкоземельные элементы в водах грязевых вулканов Керченско-Таманского региона. // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2023. – Т. 63. № 5. – С. 58–71. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-5-58-71.
14. Laird D.A. Influence of layer charge on swelling of smectites. // Applied Clay Science. – 2006. – Vol. 34. – pp. 74–87.
15. Nekipelova A., Kokh S.N., Sokol E., Kozmenko O. Major and trace element signatures in lagoon vivianite: a case study from the Kerch ooidal ironstones. // In book: XIII General Meeting of the Russian Mineralogical Society and the Fedorov Session. – 2023. – pp. 372–381. – DOI: 10.1007/978-3-031-23390-6_47.
16. Peiravi M., Dehghani F., Ackah L., Baharlouei A., Godbold J., Liu J., Mohanty M., Ghosh T. A review of rare-earth elements extraction with emphasis on non-conventional sources: coal and coal byproducts, iron ore tailings, apatite, and phosphate byproducts. // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2020. – Vol. 38. – 27 p.
17. Rudmin M., Mazurov A., Banerjee S. Origin of ooidal ironstones in relation to warming events: cretaceous-eocene bakchar deposit, south-east Western Siberia. // Marine and Petroleum Geology. – 2018. – Vol. 100. – С. 309–325. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2018.11.023.

18. Sato T., Watanabe T., Otsuka R. Effects of layer charge, charge location, and energy change on expansion properties of dioctahedral smectites. // *Clays and Clay Minerals*. – 1992. – Vol. 40. – pp. 103–113.
19. Sokol E., Kokh S.N., Kozmenko O., Nekipelova A. Geochemistry and mineralogy of rare earth elements in high-phosphorus ooidal ironstones: a case study of the Kamysh-Burun deposit (Azov-Black Sea iron province). // *Ore Geology Reviews*. – 2020. – Vol. 127. No. 3–4. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103827.
20. Yur'ev B.P., Dudko V.A., Korelina E. Optimization of siderite ore sintering operation conditions. // *Materials Science Forum*. – 2020. – Vol. 989. – pp. 417–422. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.989.417.
21. Zhu X., Han Y., Sun Y., Gao P., Li Y. Thermal Decomposition of siderite ore in different flowing atmospheres: phase transformation and magnetism. // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. – 2022. – Vol. 44. No. 3. – pp. 1–8. – DOI: 10.1080/08827508.2022.2040498.

References

1. Avdonin V.V., Boytsov V.E., Grigoryev V.M., Seminsky Zh.V., Solodov N.A., Starostin V.I. *Ore Deposits of Metallic Mineral Resources*. Moscow. Triksa. 2005. 720 p. (In Russ.)
2. Golubovskaya E.V. *Geominalogy of the Kerch Iron Ore Deposits*. Dissertation of Cand. geol.-mineral. sciences. 04.00.21. Moscow. GIN RAS. 1989. 232 p. (In Russ.)
3. State report On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2022. Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation. Moscow. Rosnedra. 2024. 640 p. (In Russ.)
4. Grigoryev V.M. Kerch iron ore basin. *Mining Encyclopedia*. Moscow. Soviet Encyclopedia. 1987. 592 p. (In Russ.)
5. Dubinin A.V. *Geochemistry of rare earth elements in the Ocean*. Moscow. Nauka. 2006. 360 p. (In Russ.)
6. Neveskaya L.A., Goncharova I.A., Ilyina L.B., Paramonova N.P., Khondkaryan S.O. On the Stratigraphic Scale of the Neogene of the Eastern Paratethys. *Stratigraphy. Geological Correlation*. 2003. Vol. 11. No. 2. pp. 3–26. (In Russ.)
7. Nekipelova A.V., Sokol E.V., Kokh S.N., Filippova K.A. Kerch sedimentary iron ores – a non-traditional source of Nd and MREE: features and prospects. *Ores and Metals*. 2022. No. 1. pp. 106–120. (In Russ.)
8. Nesterovsky V.A. Unique industrial-genetic type of sedimentary deposits. *Geology and Mineral Resources of the World Ocean*. 2020. Vol. 16. No. 1. pp. 54–68. (In Russ.)
9. Taylor S.R., MacLennan S.M. *Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Translated from English by R.N. Sobolev, L.T. Soboleva, edited by L.S. Borodin. Moscow. Mir. 1988. 381 p. (In Russ.)
10. Frolov A.A., Lapin A.V., Tolstov A.V., Zinchuk N.N., Belov S.V., Burmistrov A.A. *Carbonatites and kimberlites (relationships, mineralogeny, forecast)*. Moscow. NIA-Priroda. 2005. 540 p. (In Russ.)
11. Kholodov V.N., Golubovskaya E.V., Nedumov R.I. Cimmerian iron ore province of the Black Sea coast, conditions of its formation and prospects *Geology and Mineral Resources of the World Ocean*. 2014. No. 3. pp. 5–35. (In Russ.)
12. Kholodov V.N., Nedumov R.I., Golubovskaya E.V. Facies types of sedimentary iron ore deposits and their geochemical features. *Lithology and Mineral Resources*. 2012. No. 6. pp. 503–531. (In Russ.)
13. Chelnokov G., Kharitonova N.A., Lavrushin V., Aydarkozhina A.S., Zheng G. Rare earth elements into the aqueous phase of mud volcanoes of the Kerch-Taman region. *Moscow University Geology Bulletin*. 2023. Vol. 63. No. 5. pp. 58–71. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-5-58-71. (In Russ.)
14. Laird D.A. Influence of layer charge on swelling of smectites. *Applied Clay Science*. 2006. Vol. 34. pp. 74–87.

15. Nekipelova A., Kokh S.N., Sokol E., Kozmenko O. Major and trace element signatures in lagoon vivianite: a case study from the Kerch ooidal ironstones. In book: XIII General Meeting of the Russian Mineralogical Society and the Fedorov Session. 2023. pp. 372–381. DOI: 10.1007/978-3-031-23390-6_47.
16. Peiravi M., Dehghani F., Ackah L., Baharlouei A., Godbold J., Liu J., Mohanty M., Ghosh T. A review of rare-earth elements extraction with emphasis on non-conventional sources: coal and coal byproducts, iron ore tailings, apatite, and phosphate byproducts. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020. Vol. 38. 27 p.
17. Rudmin M., Mazurov A., Banerjee S. Origin of ooidal ironstones in relation to warming events: cretaceous-eocene bakchar deposit, south-east Western Siberia. *Marine and Petroleum Geology*. 2018. Vol. 100. pp. 309–325. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2018.11.023.
18. Sato T., Watanabe T., Otsuka R. Effects of layer charge, charge location, and energy change on expansion properties of dioctahedral smectites. *Clays and Clay Minerals*. 1992. Vol. 40. pp. 103–113.
19. Sokol E., Kokh S.N., Kozmenko O., Nekipelova A. Geochemistry and mineralogy of rare earth elements in high-phosphorus ooidal ironstones: a case study of the Kamysh-Burun deposit (Azov-Black Sea iron province). *Ore Geology Reviews*. 2020. Vol. 127. No. 3–4. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103827.
20. Yur'ev B.P., Dudko V.A., Korelina E. Optimization of siderite ore sintering operation conditions. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 989. pp. 417–422. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.989.417.
21. Zhu X., Han Y., Sun Y., Gao P., Li Y. Thermal decomposition of siderite ore in different flowing atmospheres: phase transformation and magnetism. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2022. Vol. 44. No. 3. pp. 1–8. DOI: 10.1080/08827508.2022.2040498.

УДК 550.4.02

DOI: 10.46698/VNC.2025.81.64.011

Оригинальная статья

Металлогенический аспект распределения золота во вторичных ореолах рассеяния восточной части Передового хребта

С.Г. Парада 

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

Статья поступила: 26.02.2025, доработана: 04.03.2025, принята к публикации: 05.03.2025

Резюме: Статья посвящена оценке возможности использования результатов геохимических поисков по вторичным ореолам рассеяния в металлогенических построениях и для создания геолого-поисковых моделей. На поисковой стадии одним из главных методов является геохимическая съемка вторичных ореолов рассеяния основного полезного ископаемого. После заверки выявленных геохимических аномалий этот материал обычно не используется. Вместе с тем работа с данными геохимических поисков может вывести на рудоносные или рудогенерирующие геологические комплексы, что имеет важное значение для разработки генетических и геолого-поисковых моделей. **Актуальность** настоящего исследования определяется необходимостью разработки отдельных элементов геолого-поисковых моделей золоторудных месторождений в блоке «предпосылки и признаки». **Цель.** Оценить возможность использовать результаты геохимической съемки для выявления рудоносных (рудогенерирующих) комплексов. **Материал и методы.** Использованы результаты анализов 7182 проб, отобранных из делювиально-элювиальных отложений на площади 17 км². Определение содержаний золота в пробах осуществлялось химико-спектральным методом с чувствительностью $3 \times 10^{-7}\%$. Выявление геохимических аномалий золота осуществлялось на основе ГИС-технологий с помощью программного пакета Statistica. **Результаты.** Распределение аномалий золота в наиболее перспективной восточной половине изученной площади (восточнее р. Б.Суарык) определяется, прежде всего, наиболее молодыми разломами северо-западного простирания со взбросо-сдвиговой кинематикой, фиксируемыми альпийскими дайками лейкократовых гранитов и вмещающими золотоносные скарновые тела. Это может свидетельствовать о генетической связи золотого оруденения с альпийскими малыми интрузиями. Именно очаг альпийского магматизма является рудогенерирующим комплексом в отношении золотого оруденения. В южной половине центральной части восточного участка геохимические аномалии золота имеют малые размеры, контролируются, скорее всего, разломом северо-восточного простирания и связаны с кварц-карбонатными метасоматитами. Малые размеры имеют аномалии на севере восточного участка, связанные с кварц-антимонитовыми жилами и сульфидной вкрапленностью поздней стадии гидротермального минералообразования в терригенных породах верхнекаменноугольной молассы. Полученные результаты свидетельствуют о возможности определения рудогенерирующих комплексов и использовать эти результаты в блоке «предпосылки и признаки» при разработке геолого-поисковых моделей.

Ключевые слова: геохимическая аномалия, вторичные ореолы рассеяния, золото, геолого-поисковая модель, рудоносный комплекс, Передовой хребет.

Для цитирования: Парада С.Г. Металлогенический аспект распределения золота во вторичных ореолах рассеяния восточной части Передового хребта. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 132-140. DOI: 10.46698/VNC.2025.81.64.011

DOI: 10.46698/VNC.2025.81.64.011

Original paper

Metallogenic aspect of gold distribution in the secondary scattering halos of the eastern part of the Forward Ridge

S.G. Parada 

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

Received: 26.02.2025, revised: 04.03.2025, accepted: 05.03.2025

Abstract: The article is devoted to the assessment of the possibility of using the results of geochemical searches for secondary scattering halos in metallogenic structures and for the creation of geological prospecting models. At the search stage, one of the main methods is the geochemical survey of secondary halos of the main mineral scattering. After the verification of the identified geochemical anomalies, this material is usually not used. At the same time, work with geochemical prospecting data can lead to ore-bearing or ore-generating geological complexes, which is important for the development of genetic and geological prospecting models. **The relevance** of this study is determined by the need to develop individual elements of geological prospecting models of gold deposits in the “prerequisites and signs” block. **Aim.** To evaluate the possibility of using the results of geochemical surveys to identify ore-bearing (ore-generating) complexes. **Materials and methods.** The results of analyses of 7,182 samples taken from deluvial-eluvial deposits on an area of 17 km² were used. The gold content in the samples was determined by the chemical spectral method with a sensitivity of $3 \times 10^{-7}\%$. The identification of geochemical anomalies of gold was carried out on the basis of GIS technologies using the Statistica software package. **Results.** Distribution of gold anomalies in the most promising eastern half of the studied area (east of the river B.Suaryk) is determined, first of all, by the youngest faults of the northwestern strike with uplift-shear kinematics, fixed by Alpine dikes of leucocratic granites and containing gold-bearing skar bodies. This may indicate a genetic connection between the golden mineralization and the Alpine small intrusions. It is the focus of Alpine magmatism that is the ore-generating complex in relation to gold mineralization. In the southern half of the central part of the eastern section, geochemical anomalies of gold are small in size, most likely controlled by a fault of the northeastern strike and associated with quartz-carbonate metasomatites. Anomalies in the north of the eastern section are small in size, associated with quartz-antimonite veins and sulfide inclusions of the late stage of hydrothermal mineralization in terrigenous rocks of the Upper Carboniferous molasse. The results obtained indicate the possibility of identifying ore-generating complexes and using these results in the “prerequisites and signs” block when developing geological prospecting models.

Keywords: geochemical anomaly, secondary scattering halos, gold, geological prospecting model, ore-bearing complex, Forward Ridge.

For citation: Parada S.G. Metallogenic aspect of gold distribution in the secondary scattering halos of the eastern part of the Forward Ridge. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 132-140. DOI: 10.46698/VNC.2025.81.64.011

Введение

Актуальность настоящего исследования определяется необходимостью разработки отдельных элементов геолого-поисковых моделей в блоке «предпосылки и признаки». Это можно сделать на основе изучения распределения золота во вторичных ореолах рассеяния (ВОР). Геохимические исследования территорий рудных по-

лей являются важной задачей при оценке перспективности объекта и определении направления поисковых и геологоразведочных работ [Кременецкий, 2009; Милев, 2016; Кокин, Троценко, 2016]. На поисковой стадии одним из главных методов является геохимическая съемка ВОР основного полезного ископаемого. После завершения выявленных геохимических аномалий этот материал обычно больше не используется. Вместе с тем работа с данными геохимических поисков может вывести на рудоносные или рудогенерирующие геологические комплексы, что имеет важное значение для разработки генетических и геолого-поисковых моделей. Однако некоторые исследователи считают, что в условиях сильно расчлененного рельефа такой метод не может быть эффективным, так как на крутых склонах вторичные ореолы сильно смещаются от мест выхода и разрушения полезного ископаемого.

Специальные исследования показали, что это не так. Установлено [Чекваидзе и др., 2004; Ворошилов, 2006; Бураго и др., 2013], что в активно денудированных горных районах в любых ландшафтах ВОР быстро обновляются. При этом для золота и большинства других рудных элементов, обнаруживается равенство количества химического элемента в остаточном ореоле рассеяния и в коренных породах. Это обусловлено установившимся динамическим равновесием между привносом и убылью минералов в зоне гипергенеза. Результаты сопоставления концентраций химических элементов в элювиально-делювиальных отложениях с содержаниями этих элементов в подстилающих коренных породах Северного фланга Тырныаузского рудного узла, на территории Муштинского рудного узла и других рудных узлов высокогорных районов Северного Кавказа показали практически одинаковые их значения [Маркин и др., 2014; Парада и др., 2014]. Таким образом, в зоне гипергенеза адекватно отражаются содержания рудных элементов в коренных породах. Задача выявления рудоносных и (или) рудогенерирующих комплексов на основе геохимических данных решалась нами для Зыгиркольской рудной зоны, расположенной в восточной части структурно-формационной зоны Передового хребта. Здесь, в 2009–2011 гг., по результатам поисковых работ, проведенных ООО «Каббалкгеология» под руководством автора настоящей статьи, выявлены золотые руды в скарнах и различных метасоматитах [Столяров, 2013; Парада, 2014]. К настоящему времени достаточно подробно изучены состав руд и типоморфизм самородного золота, а также геологическое строение рудного поля и геолого-геофизические условия локализации золотых руд [Столяров, 2015; Тарасов и др., 2015]. Однако требуется установить, какие из геологических комплексов являются рудоносными или рудогенерирующими [Hart, 2007]. Нерешенным вопросом остается возраст золотого оруденения и связь его с палеозойским или кайнозойским магматизмом.

Материал и методы

В пределах исследованной территории развит альпийский тип ландшафта, изобилующий скалистыми гребнями водоразделов и ущелистыми долинами ручьев, чередующимися с относительно выположенными участками, занятыми луговой растительностью. Геохимические пробы отбирались по прямоугольной сети 100x20 м. Небольшая часть территории (1,5 км²), расположенная в центральной части изученной площади, представлена практически непроходимыми скалами, где отсутствует пригодный для обора геохимических проб мелкозем. Остальная часть территории доступна для геохимического опробования. В основном она перекрыта разноразмерными элювиально-делювиальными отложениями голоцена, среди ко-

торых преобладает благоприятный для металлометрических проб мелкозем. Имеются места занятые грубообломочным коллювием. Однако там всегда можно найти мелкоземистый материал для опробования. Небольшая часть территории занята горно-ледниковыми отложениями, наиболее распространенными по долине реки Б.Суарык и верховьям реки Ташорун.

Пробы отбирались с глубины 0,2–0,4 м из представительного горизонта, в качестве которого использован подпочвенный горизонт «С», представляющий собой мелкоземистый элювиально-делювиальный материал. В соответствии с научно-методическими рекомендациями [Кокин, 2005; Полякова, 2015] они высушивались, пропускались через сито 0,5 мм и истирались до фракции менее 0,075 мм (200 меш). Золото в пробах определялось спектральным методом с предварительным химическим обогащением в ФГУГП «Кавказгеолсъемка». Всего проанализировано 7182 пробы, отобранные с площади 17 км².

Выявление геохимических аномалий золота осуществлялось на основе ГИС-технологий. По результатам площадного геохимического опробования сформирована база данных в виде таблицы Microsoft Excel, в которой отображены содержания элементов в весовых процентах и координаты точек отбора проб. С помощью программного пакета Statistica определен закон распределения. Оказалось, что эмпирическая кривая, характеризующая распределение золота в выборке имеет асимметричный вид, отличный от кривой нормального распределения. Таким образом, установлен логнормальный закон распределения, при котором статистические операции следует производить не с абсолютными значениями содержаний элементов, а с их логарифмами.

Распространенный способ выделения геохимических аномалий называется правилом «трех сигм» и основан на том, что случайная величина практически полностью (на 99,7 %) заключена в пределах от -3σ до $+3\sigma$. Если значение случайной величины отличается от среднего значения $\bar{z}$ больше чем на 3σ , то оно является аномальным [Овчинников, 1983]. Возможно применение и «двух сигм», так как в этом случае 95,4% проб заключено в пределах от $\bar{z} - 2\sigma$ до $\bar{z} + 2\sigma$. Именно при 95% уровне значимости выделялись аномалии химических элементов в настоящей работе. Определялись аномальные значения и при 99% уровне значимости. При этом использованы следующие формулы: $z = \ln x$; $\bar{z} = \ln \bar{x} - \sigma_z^2/2$; $z_1 = \bar{z} - 3\sigma_z$ ($z_1 = \bar{z} - 2\sigma_z$); $z_2 = \bar{z} + 3\sigma_z$ ($z_2 = \bar{z} + 3\sigma_z$); $x = e^z$ (е-экспонента), где $\bar{x}$ – фоновое содержание элемента, σ_z^2 – дисперсия выборки натуральных логарифмов и σ_z – стандартное отклонение вычислены с помощью приложения Statistica пакета Microsoft Excel. В качестве региональных кларковых значений золота использовано модальное значение. В качестве фоновых принимались все значения, заключенные между аномальным нижним и аномальным верхним пределами значений содержаний золота.

После соответствующих процедур весь массив данных был интегрирован в программу Surfer, где была создана поверхность содержаний элемента методом крайкинга на основе полученных пространственных данных. С помощью метода крайкинга возможно не только получить расчетную поверхность, но также определить значение точности и достоверности расчета, так как в этом методе используется информация из полувариограммы для оценки поверхности в точках, отличных от точек опробования. Соответственно выбирая необходимый радиус поиска, выраженный в расстоянии и числе минимальных точек, отображаются геохимические аномалии выбранных элементов. Для более точного отображения аномалий золота граничные значения его содержаний введены вручную.

Результаты и обсуждение

Содержания золота во вторичных ореолах рассеяния колеблются от минимально обнаруживаемых концентраций 0,003 до 8,0 г/т. Модальное (фоновое) значение составляет 0,003 г/т, нижнее аномальное значение – 0,0002 г/т, верхнее аномальное содержание при 95,4 % уровне значимости – 0,014, при 99,7 % – 0,039 г/т. Фоновые содержания золота колеблются от 0,0015 до 0,014 г/т, что составило 87,6 % от общего количества проб, что соизмеримо с кларком Au в магматических породах и в земной коре в целом (0,004–0,005 г/т), но выше, чем в осадочных породах (0,001 г/т). Таким образом, имеющиеся результаты показывают относительно низкий общий фон содержания золота в рыхлых отложениях изученного района, а установленное модальное содержание золота в ландшафтах находится в пределах кларковых значений.

Отрицательные аномалии в пределах изучаемой территории не обнаруживаются, так как содержание Au во всех пробах превышает нижний аномальный предел. Положительные аномальные значения Au (0,014 г/т и более) установлены в 874 пробах, что составило 12,4 % от выборки. Это значит, что не менее 2,1 км² исследованной территории могут содержать золотое оруденение.

Площадное распределение аномалий золота характеризуется крайней неравномерностью (рис. 1).

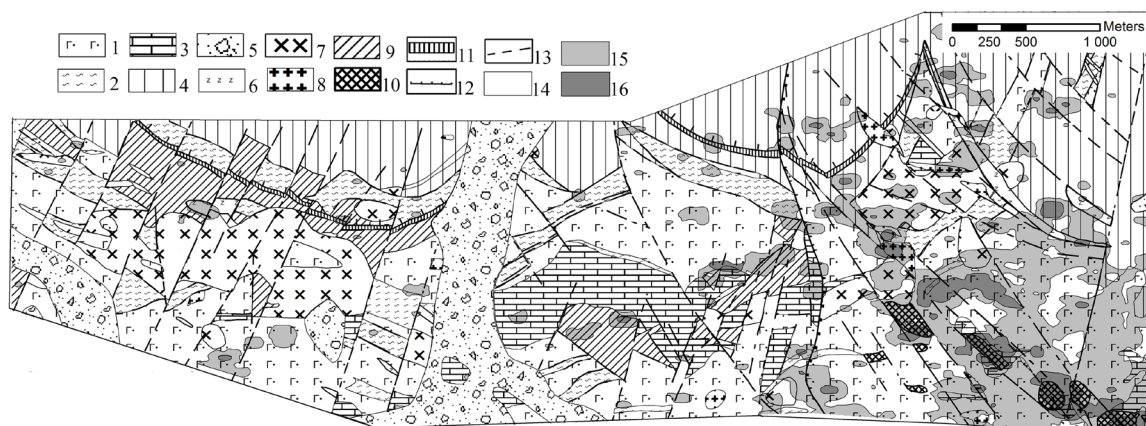


Рис. 1. Карта геологических комплексов восточной части Передового хребта с данными по распределению золота во вторичных ореолах рассеяния.

1 – 5 – стратифицированные комплексы: 1 – осадочно-вулканогенный, 2 – морской терригенный, 3 – карбонатный, 4 – континентальный обломочный (моласса), 5 – четвертичный горно-ледниковый; 6 – 8 – интрузивные комплексы: 6 – гипербазиты герцинского магматического цикла, 7 – чучкурский диорит-гранодиорит-порфировый гипабиссальный позднегерцинского магматического цикла, 8 – тырныаузский лейкократовых гранитов альпийского магматического цикла; 9 – 11 – гидротермально-метасоматические образования: 9 – кварц-карбонатные метасоматиты, 10 – скарны, 11 – лиственитизированные милониты; 12 – 13 – разломы: 12 – надвиги, 13 – сбросы и взбросы; 14 – 16 – содержание золота во вторичных ореолах рассеяния в г/т: 14 – $\leq 0,01$, 15 – 0,01 – 0,1, 16 – $\geq 0,1$ /

Fig. 1. Map of geological complexes in the eastern part of the Forward Ridge with data on the distribution of gold in secondary scattering halos.

1-5 – stratified complexes: 1 – sedimentary-volcanogenic, 2 – marine terrigenous, 3 – carbonate, 4 – continental clastic (molasse), 5 – Quaternary mountain-glacial; 6 – 8 – intrusive complexes: 6 – hyperbasites of the Hercynian magmatic cycle, 7 – Chuchkur diorite-granodiorite-porphyry hypabyssal late Hercynian magmatic cycle, 8 – Tyrnyauzian leucocratic granites of the Alpine magmatic cycle; 9-11 – hydrothermal-metasomatic formations: 9 – quartz-carbonate metasomatites, 10 – skarns, 11 – larch-reinforced mylonites; 12 – 13 – faults: 12 – thrusts, 13 – overflows and overflows; 14 – 16 – gold content in secondary scattering halos in g/t: 14 – ≤ 0.01 , 15 – 0.01 – 0.1, 16 – ≥ 0.1

Они распространены практически только в восточной половине исследуемого района, в той ее части, которая прилегает к северному флангу Тырнаузского рудного узла. Там аномалии золота образуют практически сплошной ореол, ограниченный с северо-запада юго-восточным контактом позднегерцинской интрузии кварцевых диорит-порфиров. С окончанием этой интрузии в северо-восточном направлении исчезает и геохимический ореол Au. То же самое происходит и в юго-западном направлении. В меньшей степени подобная ситуация отмечается у южной рамки площади, где геохимический ореол Au занимает полностью экзоконтактовую зону небольшого штока кварцевых диорит-порфиров.

Наиболее интенсивные геохимические аномалии с содержанием Au более 0,1 г/т совпадают с выходами на поверхность скарнов и альпийских даек лейкократовых гранитов Зыгыркольской зоны, что соответствует модели эпитермального типа [Kelley et al., 2020]. Дайки и скарны вытягиваются цепочкой в северо-западном направлении, проникая в средне-верхнекаменноугольные породы молассового комплекса, где золото локализуется вместе с сурьмой в кварц-антимонитовых жилах, что характерно для верхов рудной колонны [Kovalchuk et al., 2024]. Все четыре скарновых тела, включая не выходящий на поверхность Перевальный скарн, отображаются в еще более интенсивных геохимических аномалиях с содержанием золота от 0,5 до 8,0 г/т. Наибольшая по площади геохимическая аномалия с такой высокой интенсивностью связана с нижним скарновым телом, в котором выявлено промышленное золотое оруденение. Далее на северо-запад площадь таких интенсивных аномалий сокращается, в соответствии с уменьшением площадей выходов скарновых тел (Среднего, Верхнего, Перевального). Северо-западнее Перевального скарна небольшая интенсивная аномалия соответствует выходу небольшого штокообразного тела лейкократовых гранитов, что еще раз подтверждает связь оруденения с магматизмом [Pirajno, 2009]. И еще далее на северо-запад отмечается содержание золота более 0,5 г/т в одной точке.

Серия небольших по площади локальных геохимических аномалий с содержанием золота 0,1–0,5 г/т развита в северной части территории в пределах развития обломочного (молассового) комплекса, где они представляют центральные зоны небольших по площади и интенсивности геохимических аномалий, проявленных в связи с кварцево-жильными и сульфидно-вкрапленными рудопроявлениями сурьмы. Содержания золота 0,1–0,5 г/т обычно отмечены по 1 или 2-м подряд геохимическим пробам в пределах только одного профиля. Такие содержания отмечаются также в центральной части более крупной геохимической аномалии в точках, приуроченных к выходу небольшого штока кварцевого диорит-порфира.

Еще три геохимические аномалии, в центральных частях которых содержания золота составляют 0,1–0,5 г/т, приурочены к участкам кварц-карбонатных метасоматитов на контакте верхнедевонских-нижнекаменноугольных известняков и среднедевонских вулканитов. Следует отметить, что к северу эта аномалия не оконтурена в связи с непроходимым рельефом и отсутствием проб. Юго-восточнее этой аномалии выделяется еще одна геохимическая аномалия. Промежуток между этой и предыдущей аномалиями находится в области развития непроходимых скал и не был опробован. Не исключено, что эти две аномалии представляют собой единое целое. Следующая к юго-востоку аномалия с обогащенной центральной зоной с предыдущими двумя приурочена к одной линии северо-восточного простираения. Фактически вся западная половина изученной территории оказалась стерильной в отношении золота.

В западной половине исследуемой площади (западнее р. Б.Суарык) аномальные содержания золота во вторичных ореолах рассеяния отмечаются в единичных пробах и образуют весьма ограниченные по площади локальные слабоинтенсивные геохимические аномалии, что подтверждает незначительный вклад остальных типов оруденения [Torvela et al., 2022]. У южной рамки этого участка они связаны с медно-колчеданными рудопоявлениями хребта Ташорун, вытягиваясь в северо-восточном направлении вместе с хребтом. В центральной части этого участка одна слабо интенсивная аномалия приурочена к кварц-карбонатным метасоматитам.

Заключение

Распределение аномалий золота в наиболее перспективной восточной половине изученной площади (восточнее р. Б.Суарык) определяется, прежде всего, наиболее молодыми разломами северо-западного простирания, фиксируемыми альпийскими дайками лейкократовых гранитов и вмещающими золотоносные скарновые тела. Это может свидетельствовать о генетической связи золотого оруденения с альпийскими малыми интрузиями. Именно очаг альпийского магматизма может являться рудогенерирующим комплексом в отношении золотого оруденения.

В южной половине центральной части восточного участка геохимические аномалии золота имеют малые размеры, контролируются, скорее всего, разломом северо-восточного простирания и связаны с кварц-карбонатными метасоматитами. Малые размеры имеют аномалии на севере восточного участка, связанные с кварц-антимонитовыми жилами и сульфидной вкрапленностью поздней стадии гидротермального минералообразования в терригенных породах верхнекаменноугольной молассы.

Литература

1. Бугаго А.И., Шлыков С.А., Бугаго В.А., Митрофанов Н.П. Методы геохимической томографии и их использование в практике геологоразведочных работ. // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 11. – С. 36–41.
2. Ворошилов В.Г. О взаимосвязи структуры аномального геохимического поля с механизмом формирования гидротермальной системы. // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. № 4. – С. 35–40.
3. Кокин А.В. Оценка перспективности рудных объектов (теория и практика). Ростов-на-Дону: ООО «Ростиздат», 2005. – 384 с.
4. Кокин А.В., Трощенко В.В. Зональность эндогенных рудных месторождений, как отражение фундаментальных свойств химических элементов. // Наука Юга России. – 2016. – Т. 12. № 2. – С. 28–42.
5. Кременецкий А.А. Поисковые геолого-геохимические модели рудных месторождений: проблемы и решения. // Разведка и охрана недр. – 2009. – № 5. – С. 3–7.
6. Маркин М.Ю., Столяров В.В., Шишкалов И.Ю. Геологические условия локализации золотого оруденения северного фланга Тырныаузского рудного поля. // Вестник Южного научного центра. – 2014. – Т. 10. № 2. – С. 44–51.
7. Миляев С.А. Комплекс геохимических признаков для обоснования прогноза оруденения на глубину (на примере месторождений золотосульфидно-кварцевой и золотосеребряной формаций). // Отечественная геология. – 2016. – № 2. – С. 53–58.
8. Овчинников Л.Н. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М.: Недра, 1983. – 191 с.
9. Парада С.Г. Перспективные геолого-промышленные типы рудопоявлений золота в ростовской области. // Вестник Южного научного центра РАН. – 2014. – Т. 10. № 4. – С. 53–60.

10. Парада С.Г., Столяров В.В., Маркин М.Ю., Шишкалов И.Ю. Проявление потенциально платиноносных гипербазитов в геохимических аномалиях Ni, Cr и Co на примере восточной части Передового хребта (Кабардино-Балкарская республика). // Геология и геофизика Юга России. – 2014. – № 2. – С. 42–54.

11. Полякова Т.Н. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. Воронеж: ВГУ, 2015. – 42 с.

12. Столяров В.В. Прогнозно-поисковая модель золотого оруденения в скарнах Северного фланга Тырныаузского рудного поля (Кабардино-Балкарская республика). // Руды и металлы. – 2015. – № 3. – С. 25–37.

13. Столяров В.В. Стадийность минералообразования в золотосульфидных рудах северного фланга Тырныаузского рудного поля (Кабардино-Балкарская республика). // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2013. – № 2. – С. 30–33.

14. Тарасов В.А., Емкужев М.С., Парада С.Г., Столяров В.В. Геофизические методы при поисках золоторудной минерализации на флангах Тырныаузского рудного узла. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2015. – № 1. – С. 109–117.

15. Чекваидзе В.Б., Миляев С.А., Исакович И.З. Комплексная петрографо-минералогическая методика поисков золоторудных месторождений. М.: Бородино-Е, 2004. – 132 с.

16. Hart C.J.R. Reduced intrusion-related gold systems. // In: Mineral Deposits of Canada: a synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods. / Ed. W.D. Goodfellow. – Geological Association of Canada. – 2007. – Vol. 5. – pp. 95–112.

17. Kelley K.D., Spry P.G., McLemore V.T., Fey D.L., Anderson E.D. Alkalic-type epithermal gold deposit model. // In: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-R. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2020. – 74 p. DOI: 10.3133/sir20105070R.

18. Kovalchuk E.V., Tagirov B.R., Borisovsky S.E. Gold and arsenic in pyrite and marcasite: hydrothermal experiment and implications to natural ore-stage sulfides. // Minerals. – 2024. – Vol. 14. No. 2. – Art. No. 170.

19. Pirajno F. Hydrothermal Processes and Mineral Systems. Springer Netherlands, 2009. – 1252 p.

20. Torvela T., Lambert-Smith J.S., Chapman R.J. (eds.) Recent advances in understanding gold deposits: from Orogeny to Alluvium. London: Geological Society, 2022. – Vol. 516.

References

1. Burago A.I., Shlykov S.A., Burago V.A., Mitrofanov N.P. Methods of geochemical tomography and their use in the practice of geological exploration. Prospect and protection of mineral resources. 2013. No. 11. pp. 36–41. (In Russ.)

2. Voroshilov V.G. On the relationship between the structure of the anomalous geochemical field with the mechanism of formation of hydrothermal system. Proceedings of Tomsk Polytechnic University. 2006. Vol. 309. No. 4. pp. 35–40. (In Russ.)

3. Kokin A.V. Assessment of ore objects prospectivity (theory and practice). Rostov-on-Don. Rostizdat LLC. 2005. 384 p. (In Russ.)

4. Kokin A.V., Troshchenko V.V. Zoning of endogenous ore deposits as a reflection of fundamental properties of chemical elements. Science in the South of Russia. 2016. Vol. 12. Issue 2. pp. 28–42. (In Russ.)

5. Kremenetsky A.A. Geological and geochemical models of prospecting ore deposits: problems and solutions. Prospect and protection of mineral resources. 2009. No. 5. pp. 3–7. (In Russ.)

6. Markin M.Yu., Stolyarov V.V., Shishkalov I.Yu. Geological conditions of localization of the gold mineralization of the Northern flank of the Tyrnyauz ore field. Bulletin of the Southern Scientific Center. 2014. Vol. 10. No. 2. pp. 44–51. (In Russ.)

7. Milyaev S.A. Complex geochemical characteristics as justification for the prediction of the mineralization at depth (for example, fields of gold-sulfide-quartz and gold-silver formations). *Otechestvennaya Geologiya*. 2016. No. 2. pp. 53–58. (In Russ.)
8. Ovchinnikov L.N. Instruction on geochemical methods of ore deposits prospecting. Moscow. Nedra. 1983. 191 p. (In Russ.)
9. Parada S.G. Promising geological-industrial types of golden ore manifestations in the Rostov region. *Proceedings of the Southern Scientific Center RAS*. 2014. Vol. 10. No. 4. pp. 53–60. (In Russ.)
10. Parada S.G., Stolyarov V.V., Markin M.U., Shishkalov I.U. Manifestation of potentially platinum containing ultrabasites in the geochemical anomalies of Ni, Cr and Co based on the example of the eastern part of Forward Ridge (Kabardino-Balkarskaya Republic). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2014. No. 2. pp. 42–54. (In Russ.)
11. Polyakova T.N. Geochemical methods of prospecting for mineral deposits. Voronezh. Voronezh State University. 2015. 42 p. (In Russ.)
12. Stolyarov V.V. Predictive exploration model of auriferous skarns, Tyrnyauz ore field, Kabardino-Balkaria. *Ores and metals*. 2015. No. 3. pp. 25–37. (In Russ.)
13. Stolyarov V.V. Stage of mineralization in gold-sulfide ores of the northern flank of Tyrnyauz ore field (Kabardino-Balkar Republic). *Actual problems of humanitarian and natural sciences*. 2013. No. 2. pp. 30–33. (In Russ.)
14. Tarasov V.A., Emkuzhev M.S., Parada S.G., Stolyarov V.V. Geophysical methods in the search for gold mineralization on the flanks of the Tyrnyauz ore cluster. *Proceedings of Voronezh State University. Geology*. 2015. No. 1. pp. 109–117. (In Russ.)
15. Chekvaidze V.B., Milyaev S.A., Isakov I.Z. Complex petrographic-mineralogical-geochemical methodology of prospecting for gold deposits. Moscow. Borodino-E. 2004. 132 p. (In Russ.)
16. Hart C.J.R. Reduced intrusion-related gold systems. In: *Mineral Deposits of Canada: a synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*. Ed. W.D. Goodfellow. Geological Association of Canada. 2007. Vol. 5. pp. 95–112.
17. Kelley K.D., Spry P.G., McLemore V.T., Fey D.L., Anderson E.D. Alkaline-type epithermal gold deposit model. In: *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-R*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2020. 74 p. DOI: 10.3133/sir20105070R.
18. Kovalchuk E.V., Tagirov B.R., Borisovsky S.E. Gold and arsenic in pyrite and marcasite: hydrothermal experiment and implications to natural ore-stage sulfides. *Minerals*. 2024. Vol. 14. No. 2. Art. No. 170.
19. Pirajno F. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer Netherlands. 2009. 1252 p.
20. Torvela T., Lambert-Smith J.S., Chapman R.J. (eds.) *Recent advances in understanding gold deposits: from Orogeny to Alluvium*. London: Geological Society. 2022. Vol. 516.

УДК 553.6; 553.5; 691.42; 691.43

DOI: 10.46698/VNC.2025.31.49.012

Оригинальная статья

Адсорбционные свойства цеолитсодержащих кремнисто-карбонатных пород Дагестана

А.Р. Юсупов , С.А. Мамаев , З.В. Атаев 

Институт геологии ДФИЦ РАН, Россия, 367010, г. Махачкала, ул. Ярагского, 75,
e-mail: dangeogis@mail.ru

Статья поступила: 12.09.2024, доработана: 31.01.2025, одобрена в печать: 02.02.2025

Резюме: Актуальность работы. По минеральному составу цеолитсодержащие породы Нагорного Дагестана можно с долей условности сопоставить с цеолитовым сырьем Татарско-Шатрашанского месторождения, находящегося в Республике Татарстан, принципиальная возможность использования которого установлена многочисленными испытаниями. Цеолиты же Левашинской площади (свыше 80% гейландита-клиноптилолита) по качеству уникальны и сопоставимы по продуктивности только с высококачественными цеолитовыми рудами Мысовского месторождения в Ханты-Мансийском АО и месторождения Хонгуруу в Республике Саха (Якутия). Они заведомо пригодны для применения в качестве адсорбентов и активных ионообменников, а также в медицинской и др. ответственных направлениях и технологиях. **Цель исследования.** Целью наших исследований является рассмотрение данных пород как сырья для применения в качестве адсорбентов и активных ионообменников, в соответствии с результатами лабораторно-технологического изучения. **Методика.** Токсичность цеолитовых и цеолитсодержащих пород определялась спектральным полуколичественным и ионометрическим количественным анализами. Проводилось определение минерального состава, физико-механических и адсорбционно-структурных параметров. **Результаты исследований.** Установлено, что адсорбционная способность цеолитсодержащих кремнисто-карбонатных пород (ЦКП) определяется либо суммарным содержанием в породе опал-кристобалита (ОКТ), цеолита (Ц) и монтмориллонита (ММ) и оценивается по группе порошковых адсорбционных материалов, либо суммарным содержанием только ОКТ и цеолита и оценивается по группе зернистых адсорбентов.

Ключевые слова: цеолиты, цеолитсодержащие породы, кремнистые породы, кальцит, эоцен, опал-кристобалит-тридимит, адсорбент, монтмориллонит, ионообменная активность, Дагестан.

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания Института геологии ДФИЦ РАН № НИОКТР 1021060808457-2-1.5.6 и № НИОКТР 1021060808460-6-1.5.6.

Для цитирования: Юсупов А.Р., Мамаев С.А., Атаев З.В. Адсорбционные свойства цеолитсодержащих кремнисто-карбонатных пород Дагестана. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 141-150. DOI: 10.46698/VNC.2025.31.49.012

DOI: 10.46698/VNC.2025.31.49.012

Original paper

Adsorption properties of zeolite-containing silico-carbonate rocks of Dagestan

A.R. Yusupov^{id}, S.A. Mamaev^{id}, Z.V. Ataev^{id}

Institute of Geology, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences,
75 M. Yaragского Str., Makhachkala 367010, Russian Federation,
e-mail: dangeogis@mail.ru

Received: 12.09.2024, revised: 31.01.2025, accepted: 02.02.2025

Abstract: Relevance. In terms of mineral composition, zeolite-containing rocks of Nagornyy Dagestan can be roughly compared with zeolite raw materials of the Tatarsko-Shatrashanskoye deposit, located in the Republic of Tatarstan, the fundamental possibility of using which has been established by numerous tests. Zeolite of the Levashinskaya area (over 80% heulandite-clinoptilolite) is unique in quality and comparable in productivity only with high-quality zeolite ores of the Mysovskoye deposit in the Khanty-Mansi Autonomous Area and the Honguruy deposit in the Republic of Sakha (Yakutia). They are obviously suitable for use as adsorbents and active ion exchangers, as well as in medical and other important areas and technologies. **Aim.** The purpose of our research is to consider these rocks as raw materials for use as adsorbents and active ion exchangers, in accordance with the results of laboratory and technological study. **Methodology.** The toxicity of zeolite and zeolite-containing rocks was determined by spectral semi-quantitative and ionometric quantitative analyses. The mineral composition, physical-mechanical and adsorption-structural parameters were determined. **Research results.** It has been established that the adsorption capacity of zeolite-containing siliceous-carbonate rocks (SCR) is determined either by the total content of opal-cristobalite (OCT), zeolite (Z) and montmorillonite (MM) in the rock and is estimated by the group of powder adsorption materials, or by the total content of only OCT and zeolite and is estimated by the group of granular adsorbents.

Keywords: zeolites, zeolite-containing rocks, siliceous rocks, calcite, Eocene, opal-cristobalite-tridymite, adsorbent, montmorillonite, ion-exchange activity, Dagestan.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Geology of the Dagestan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences No. NIOKTR 1021060808457-2-1.5.6 and No. NIOKTR 1021060808460-6-1.5.6.

For citation: Yusupov A.R., Mamaev S.A., Ataev Z.V. Adsorption properties of zeolite-containing siliceous-carbonate rocks of Dagestan. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 141-150. DOI: 10.46698/VNC.2025.31.49.012

Введение

Ионообменная (катионообменная) способность является одним из важнейших свойств цеолитовых руд и цеолитсодержащих пород. На способности к ионному обмену основано использование природных цеолитов для очистки питьевых и сточных вод от аммония, цветных, тяжелых и радиоактивных металлов; для разделения и концентрирования ценных элементов (ситовой эффект); в качестве мелиорантов в земледелии и др. [Алехина и др., 2016; Бартенев и др., 2008; Винокуров и др., 2017; Дистанов, Конюхова, 1999; Alekberov et al., 2021; Melnikov et al., 2020; Мельников и др., 2022]. Катионообменная способность природ-

ного цеолитового сырья основных месторождений России изменяется от 21 до 108 мг-экв/100 г породы, при этом ведущая роль в процессе принадлежит иону Ca^{++} [Конюхова, Дистанов, 2000; Винокуров и др., 2017; Первов, 2009; Прокофьев и др., 2020]. Ионообменной способностью обладают не только минералы группы цеолитов, но и ОКТ-фаза (точнее, активный, или аморфный, растворимый в 5%-ой KOH SiO_2) и глинистая составляющая. Способность пород Левашинской и Рубасчайской площадей Дагестана к ионному обмену находится в прямой зависимости от содержания цеолитов [Талпа и др., 1992; Харди́ков, 2005; Харди́ков и др., 1992].

Изученные представительные пробы цеолитсодержащих пород Левашинской и Рубасчайской площадей Нагорного Дагестана (4 анализа) в основной массе характеризуются суммарной ионообменной способностью в пределах 37–90 мг-экв/100 г, что сопоставимо со средними по качеству цеолитовыми рудами, например, Пегасского месторождения в Кузбассе, 57% клиноптилолита (43 мг/экв), которые находили свое применение в сельском хозяйстве (птицеводство, животноводство), Тайжугенского месторождения в Казахстане, 40% клиноптилолита (21 мг/экв), месторождения Хонгуруу в Якутии, I пласт, 84% клиноптилолита (43 мг/экв), Чугуевского месторождения в Приморье, 60% клиноптилолита, 10% морденита (53 мг/экв), Лютогского месторождения на Сахалине, 50% клиноптилолита (63 мг/экв), Ягоднинского месторождения на Камчатке, 45% клиноптилолита, 20% морденита (62 мг/экв). Отдельные же пробы долины р. Хала-Горк Левашинской площади проявляют аномально высокую суммарную ионообменную емкость – 123–125 мг/экв. К ним по сумме обменных катионов приближаются пробы, взятые поблизости от нее на Левашинской площади. Таким образом, перспективы использования отдельных цеолитсодержащих пород Нагорного Дагестана при решении экологических проблем, в сельском хозяйстве, тонких химических и нефтяных технологиях весьма высокие [Юсупов и др., 2022; 2023].

Цель работы. Вопрос создания минерально-сырьевой базы цеолитов в европейской части России является весьма актуальным. Одной из наиболее перспективных с геологической точки зрения является территория Северного Кавказа и юга Русской платформы.

Кремнистые породы опал-кристобалит-тридимитового (ОКТ) состава с содержанием цеолитов (10–50%) развиты на Левашинском и Рубасчайском участках Республики Дагестан (РД). На других участках региона такие породы проявлены в ограниченном объеме. Впервые эти породы Дагестана нами рассматриваются как сырье для получения адсорбентов и активных ионообменников. Это имеет большое значение для республики и других регионов России при современном растущем объеме промышленности и сельского хозяйства.

Методы исследований

Токсикологические свойства

Токсичность цеолитовых и цеолитсодержащих пород определялась спектральным полуколичественным и ионометрическим количественным анализами.

Спектральный полуколичественный анализ позволил с долей условности определить степень токсичности цеолитовых и цеолитсодержащих пород Левашинской и Рубасчайской площадей по мышьяку, свинцу, ртути и кадмию.

Даже учитывая приблизительный характер результатов спектрального анализа, можно предположить, что в допустимые границы цеолитовое сырье Нагорного Дагестана все же укладывается.

Более точные результаты дает ионометрический количественный анализ по фтору (его количество не должно превышать 0,04–0,15%). Левашинская площадь 0,02–0,084%, что также соответствует допустимым пределам.

Спектральным полуколичественным анализом аномалий в распределении других определяемых химических элементов не обнаружено.

Из физико-механических параметров определялись водостойкость, механическая прочность на раздавливание, истираемость, измельчаемость, виброизнос и условная механическая прочность.

Результаты работ

Цеолитсодержащие кремнисто-карбонатные породы (ЦКП) – представляют собой нетрадиционный вид адсорбционного сырья. Содержание опал-кристобалита в нем находится в пределах 28–66%, цеолита (клиноптилолит-гейландит) – 7–50%, глинистой составляющей 7–30% (в том числе монтмориллонита 3–15%), кальцита до 25%.

В результате работ проведена комплексная аналитико-технологическая оценка качества 13 проб по группе зернистых адсорбционных материалов, включающая определение минерального состава, физико-механических и адсорбционно-структурных параметров: одна проба ЦКП (ЛТ-5) – по группе порошковых адсорбционных материалов; 11 проб цеолитсодержащих кремнистых пород (ОП-2/2, ОП-2/3, ОП-7/3, ОП-17/3, ОП-5/1, ОП-12/2, ОП-12/3, ОП-15/2, ОП-16/2, ОП-17/1 и ОП-17/2) и одна проба цеолитита (ЛТ-3).

Проведены: испытания пробы ЛТ-3 как сорбционно-фильтрующего материала для очистки питьевых вод от вредных примесей; испытания пробы ЛТ-5 для очистки дизельных и растительных масел; изучение возможности использования цеолитов и цеолитсодержащих кремнисто-карбонатных пород для получения органоминеральных удобрений пролонгирующего действия.

Установлено, что адсорбционная способность ЦКП определяется либо суммарным содержанием в породе опал-кристобалита (ОКТ), цеолита (Ц) и монтмориллонита (ММ) и оценивается по группе порошковых адсорбционных материалов, либо суммарным содержанием только ОКТ и цеолита и оценивается по группе зернистых адсорбентов.

Подготовка 11 объединенных проб и пробы ЛТ-3 заключалась в выделении рабочей фракции 1,0–4,0 мм (для пробы ЛТ-5 – фр. <1,0 мм) и прокаливании при 350 °С.

Анализ минерального состава показал, что 11 изученных проб ЦКП низкого качества, поскольку суммарное содержание ОКТ+Ц+ММ менее 60%, а именно 45–57%. Для данных проб характерно высокое содержание кальцита: в пробах ОП-2/3, ОП-7/3, ОП-16/2, ОП-12/3 – 34–36%, в остальных шести пробах – 40–54%. Проба ОП-5/1 не может быть отнесена к адсорбционному сырью не только из-за низкого содержания полезных компонентов в породе (ОКТ+ММ – 19%), но и в связи с очень высокими значениями карбонатности (кальцита 70%).

Из физико-механических параметров основными являются водостойкость (по требованиям должна быть не менее 96%), механическая прочность на раздавливание (не менее 100 кг/см² при 105 °С), истираемость (не более 3%), измельчаемость (не более 5%), виброизнос (не более 3%) и условная механическая прочность (не более 5%) [Асламова и др., 2019; Храмцова и др., 2019; Гордина и др., 2019]. Данным требованиям отвечает лишь проба ОП-2/2 – она водостойкая (97,6%), имеет средние значения механической прочности (99 кг/см²), низкие – истираемости (0,35%) и измельчаемости (0,09%); условная механическая прочность в пределах нормы (4,5%). По физико-механическим свойствам к вышеуказанной пробе близки пробы ОП-17/2 и ОП-17/3, которые уступают первой только по механической прочности (89 и 91 кг/см²). Остальные изученные пробы не водостойкие (87–95%), механически не прочные (39–67 кг/см²) и соответственно имеют высокие показатели условной механической прочности (7,20–10,40%). Низкие значения водостойкости и механической прочности исследованных проб можно объяснить низким суммарным содержанием в породах опал-кristобалита и цеолитов – менее 60%. Для всех проб определены массовая доля воды и виброизнос, которые находятся в пределах нормы.

Адсорбционно-структурные свойства ЦКП прямо зависят от минерального состава, а именно от соотношения в породе опал-кristобалита, цеолита и монтмориллонита. Из сравнительного анализа полученных адсорбционно-структурных параметров следует, что все пробы узкопористые: объем пор по парам бензола не высок 0,102–0,124 см³/г – для проб ОП-2/3, ОП-7/3, ОП-16/2 и ОП-12/3; 0,077–0,092 см³/г – для остальных. Наиболее высокие значения удельной поверхности – более 77 м²/г (77–83 м²/г) зафиксированы для проб, у которых суммарное содержание опал-кristобалита и цеолита составляет более 46% (табл. 1).

В целом, изученные 11 проб цеолитсодержащих кремнистых пород по группе адсорбентов отнесены к низкокачественному, узкопористому адсорбционному сырью с высоким содержанием кальция.

Цеолитсодержащая кремнистая порода (проба ЛТ-5) отнесена к среднекачественному порошковому адсорбционному сырью: суммарное содержание ОКТ (38,3%) + Ц (21%) + ММ (1,4%) составило 60,7%. Из физико-механических свойств были определены плотность пикнометрическим методом (2277 кг/м³), объемно-насыпная масса (1012 кг/м³), насыпная плотность (1,2960 г/см³) и массовая доля воды (5,17%). Представленная проба узкопористая – объем пор 0,104 см³/г, удельная поверхность 77 м²/г и пористость 56%.

Проба ЛТ-3 цеолитита отнесена к высококачественным (суммарное содержание ОКТ (8,5%) + Ц (67,5%) составляет 76%), среднепористым (объем пор по парам бензола – 0,190 см³/г, средний диаметр пор по воде – 17,30 нм, предельный сорбционный объем по воде – 0,0694 см³/г) зернистым адсорбентам с высокими значениями удельной поверхности (119 м²/г), пористости (53,60%) и объема суммарного по воде (0,520 см³/г), микропористость составила 34,61%, содержание мезо-, макропор равно 0,1311 см³/г. Изученная проба механически прочная (192 кг/см² при 300 °С), водостойкая (99,60%) и имеет небольшой процент виброизноса (0,01%).

Таблица 1 / Table
Адсорбционно-структурные параметры цеолитов кремнистых пород Левашинской и Рубашайской площадей /
Adsorption-structural parameters of zeolites of zeolite-containing siliceous rocks of the Levashinskaya and Rubaschayskaya areas

Проба / Sample	Удельная поверхно сть по толуолу, м ² /г / Specific surface area for toluene, m ² /g	Объем пор по парам бензола, см ³ /г / Pore volume for benzene vapor, cm ³ /g	Средний диаметр пор, нм / Average pore diameter, nm		Порис тость пикномет рическим методом, % Porosity by ruseometri с method, %	По титрованию водой / By titration with water				Предельный сорбционный объем по парам воды, см ³ /г, Maximum sorption volume for water vapor, cm3/g, at P/Ps=			Микроп ористос ть, % / Micropo rosity, %	Сумма мезо-, макропор, см ³ /г % / Sum of meso-, macropores, cm3/g%
			по воде/ on water	по бензо лу / for benze не		Плотность, г/см ³ / Density, g/cm ³	Суммар ный объем, см ³ /г / Total volume, cm3/g	Пори стост ь, % / Poros ity, %	при P/Ps= / Maximum sorption volume for water vapor, cm3/g, at P/Ps=	0,11	0,47	0,98		
Цеолитсодержащие кремнистые породы / Zeolite-containing siliceous rocks														
Объединенная, ОП-2/2 / United, OP-2/2	54	0,115	32,60	8,50	-	2,1903	1,1153	0,440	48,45	0,0197	0,0328	0,1045	31,39	0,0717
-/- ОП-2/3 / OP-2/3	71	0,124	29,60	7,00	-	2,3204	1,2033	0,400	48,13	0,0173	0,0366	0,1185	30,89	0,0819
-/- ОП-7/3 / OP-7/3	83	0,102	18,30	4,90	-	2,2685	1,2183	0,380	46,30	0,0226	0,0381	0,1122	33,96	0,0741
-/- ОП-5/1 / OP-5/1	36	0,095	60,00	10,60	-	2,3932	1,0438	0,540	56,37	0,0066	0,0116	0,0603	19,24	0,0487
-/- ОП-12/2 / OP-12/2	65	0,077	23,40	4,70	-	2,1789	1,1918	0,380	45,29	0,0149	0,0307	0,0884	34,73	0,0577
-/- ОП-12/3 / OP-12/3	77	0,103	21,80	5,40	-	2,1840	1,1389	0,420	47,84	0,0186	0,0344	0,1199	28,69	0,0855
-/- ОП-15/2 / OP-15/2	83	0,082	17,30	4,00	-	2,1783	1,2209	0,360	43,95	0,0186	0,0398	0,0970	41,03	0,0572
-/- ОП-16/2 / OP-16/2	83	0,106	15,40	5,10	-	2,4485	1,3729	0,320	43,94	0,0217	0,0405	0,1100	36,82	0,0695
-/- ОП-17/1 / OP-17/1	42	0,081	40,00	7,70	-	2,5661	1,2351	0,420	51,87	0,0124	0,0203	0,0733	27,69	0,0530
-/- ОП-17/2 / OP-17/2	71	0,092	22,50	5,20	-	2,1090	1,1439	0,400	45,76	0,0192	0,0357	0,1007	35,45	0,0650
-/- ОП-17/3 / OP-17/3	83	0,093	19,30	4,50	-	2,3916	1,2223	0,400	48,89	0,0206	0,0336	0,0893	37,63	0,0557
Лабораторно-технологическая, ЛТ-5 / Laboratory and technological, LT-5	77	0,104	14,55	5,40	56	-	-	0,280	-	-	0,0374	0,1285	29,10	0,0911
Цеолитит / Zeoliteite														
Лабораторно-технологическая, ЛТ-3 / Laboratory and technological, LT-3	119	0,190	17,30	6,30		2,2209	1,0307	0,520	53,60	0,0510	0,0694	0,2005	34,61	0,1311

Можно привести следующие технические требования к качеству цеолитов и цеолитсодержащих кремнисто-карбонатных пород для предварительной их оценки по группе адсорбционных материалов по следующим направлениям использования в промышленности и сельском хозяйстве в качестве [Trifan et al., 2021; Prokofiev et al., 2020; Raso et al., 2020]:

- сорбционно-фильтрующих материалов для очистки питьевых и сточных вод от вредных примесей – ЛТ-3;
- адсорбентов для осушки нефтяных газов и воздуха – ЛТ-3;
- адсорбентов для сероочистки углеводородного сырья – ЛТ-3;
- адсорбентов для очистки газов ТЭЦ от SO_x – ЛТ-3;
- основы для получения гранулированных органоминеральных удобрений – ЛТ-3, ЛТ-5, ОП-2/3, ОП-12/2, ОП-12/3, ОП-16/2;
- подкормки в животноводстве; мелиорантов, пролонгаторов, инсектицидов и кондиционирующих добавок в земледелии и др. – ЛТ-5, ОП-2/3, ОП-12/2, ОП-12/3, ОП-16/2.

Для каждого направления использования подобраны соответствующие пробы, отвечающие техническим требованиям.

Выводы

Адсорбционная способность ЦКП определяется либо суммарным содержанием в породе опал-кristобалита (ОКТ), цеолита (Ц) и монтмориллонита (ММ) и оценивается по группе порошковых адсорбционных материалов, либо суммарным содержанием только ОКТ и цеолита и оценивается по группе зернистых адсорбентов.

Изученные 11 проб цеолитсодержащих кремнистых пород по группе адсорбентов отнесены к низкокачественному, узкопористому адсорбционному сырью с высоким содержанием кальцита.

Цеолитсодержащая кремнистая порода (проба ЛТ-5) отнесена к среднекачественному порошковому адсорбционному сырью.

Проба ЛТ-3 цеолитита отнесена к высококачественному сырью. Приведены технические требования к качеству цеолитов и цеолитсодержащих кремнисто-карбонатных пород для предварительной их оценки по группе адсорбционных материалов.

Литература

1. Алехина М.Б., Конькова Т.В., Ахназарова С.Л. Адсорбция органических красителей из водных растворов на цеолитах типа Y. // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2016. – Т. 16. № 3. – С. 281–290.
2. Асламова В.С., Шалунц Л.В., Обуздина М.В., Грабельных В.А. Моделирование процесса адсорбции в системе жидкость – твердое тело: регрессионный анализ извлечения меди из водных растворов цеолитом Холинского месторождения, модифицированным серосодержащим полимером. // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2019. Т. 9. № 2. – С. 351–359. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-2-351-359.
3. Бартенев В.К., Бельчинская Л.И., Жабин А.В., Ходосова Н.А. Опыт исследования сорбционной способности минеральных образований в зависимости от их состава. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2008. – № 2. – С. 133–136.
4. Винокуров Е.Г., Зуев К.В., Колдаева Т.Ю., Перевалов В.П., Мирошников В.С. Адсорбция фталоцианината цинка на углеродных материалах. // Макрогетероциклы. – 2017. – Т. 10. № 4-5. – С. 526–530. DOI: 10.6060/mhc170623v.

5. Гордина Н.Е., Прокофьев В.Ю., Борисова Т.Н., Елизарова А.М. Синтез гранулированных низко модульных цеолитов из метакаолина с использованием механохимической активации и ультразвуковой обработки. // Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология. – 2019. – Т. 62. Вып. 7. – С. 99-106. DOI: 10.6060/ivkkt201962fp.5725.
6. Дистанов У.Г., Конюхова Т.П. Минеральное сырье. Сорбенты природные. М.: Геоинформмарк, 1999. – 42 с.
7. Конюхова Т.П., Дистанов У.Г. Технологическая классификация смешанных кремнистых цеолитсодержащих пород. // Разведка и охрана недр. – 2000. – № 9. – С.45–46.
8. Мельников В.Б., Федорова Е.Б., Макарова Н.П., Гафарова Э.Б. Исследование динамической адсорбционной активности силикагелей в осушке газов. // Нефтепромысловое дело. – 2022. – № 5(641). – С. 51-53. DOI: 10.33285/0207-2351-2022-5(641)-51-53.
9. Первов А.Г. Современные высокоэффективные технологии очистки питьевой и технологической воды с применением мембран, обратный осмос, нанофильтрация, ультрафильтрация. М.: АСВ, 2009. – 282 с.
10. Прокофьев В.Ю., Гордина Н.Е., Захаров О.Н., Цветова Е.В., Колобкова А.Е. Гранулированные низко модульные цеолиты для извлечения катионов Со. // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2020. – Т. 63. Вып. 6. – С. 44–49. DOI: 10.6060/ivkkt.20206306.6144.
11. Талпа Б.В., Агарков Ю.В., Бардин Ю.Ю. Кремнистые породы – новая сырьевая база стройиндустрии Северного Кавказа. // Разведка и охрана недр. – 1992. – № 11. – С. 12–14.
12. Хардилов А.Э. Цеолиты Северного Кавказа. Ростов-на-Дону: Изд. Ростовского университета, 2005. – 224 с.
13. Хардилов А.Э., Бойко Н.И., Агарков Ю.В. Цеолиты Восточного Предкавказья и перспективы их практического использования. // Известия высших учебных заведений. Серия: Геология и разведка. – 1992. – № 6. – С. 86–91.
14. Храмцова А.П., Прокофьев В.Ю., Гордина Н.Е., Чередникова Д.С., Константинова Е.М. Термическое поведение смеси на основе метакаолина для синтеза цеолита LTA. Влияние ультразвуковой обработки. // Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология. – 2019. – Т. 62. Вып. 2. – С. 65–71. DOI: 10.6060/ivkkt.20196202.5702.
15. Юсупов А.Р., Мамаев С.А., Юсупов З.А., Мамаев А.С. Особенности цеолитсодержащих кремнисто-карбонатных пород Дагестана. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 99–107.
16. Юсупов А.Р., Мамаев С.А., Юсупов З.А., Мамаев А.С. Цеолитсодержащие кремнистые породы Дагестана как добавка для получения керамической волластонитсодержащей облицовочной плитки. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 4. – С. 142–152.
17. Alekberov Y.Z., Khalilov R.Z., Ismailova X.G. Research and application of natural zeolite in the processes of gas purification and drying. // SOCAR Proceedings Special Issue. – 2021. – No. 2. – pp. 016–021.
18. Melnikov V.B., Fedorova E.B., Gafarova E.B. Comparative evaluation of adsorbents for natural gas dehydration at liquefied natural gas plant. // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2020. – Vol. 56. – pp. 31–35. DOI: 10.1007/s10553-020-01107-9.
19. Prokofiev V.Yu., Gordina N.E., Zakharov O.N., Tsvetova E.V., Kolobkova A.E. Granular low-modulus zeolites for extraction of Co cations. // Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology. – 2020. – Vol. 63. Issue 6. – pp. 44–49. DOI: 10.6060/ivkkt.20206306.6144.
20. Raso R., Tovar M., Lasobras J., Herguido J., Kumakiri I., Araki S. Comparison of zeolite membranes towards their use in membrane reactors for CO₂ hydrogenation to methanol. // Catalysis Today. – 2020. – Vol. 364. – pp. 270-275. DOI: 10.1016/j.cattod.2020.03.014.
21. Trifan B., Lasobras J., Soler J. Modifications in the composition of CuO/ZnO/Al₂O₃ catalyst for the synthesis of methanol by CO₂ hydrogenation. // Catalysts. – 2021. – Vol. 11. No. 774. DOI: 10.3390/catal11070774.

References

1. Alekhina M.B., Konkova T.V., Aknazarova S.L. Adsorption of organic dyes from aqueous solutions on the type Y zeolites. *Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protsessy*. 2016. Vol. 16. No. 3. pp. 281–290. (In Russ.)
2. Aslamova V.S., Shalunc L.V., Obuzdina M.V., Grabelnykh V.A. Modelling the process of adsorption in the liquid-solid system: Regression analysis of copper extraction from aqueous solutions by zeolite from the Kholinskoye deposit modified by a sulphur-containing polymer. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2019. Vol. 9. No. 2. pp. 351–359. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-2-351-359. (In Russ.)
3. Bartenev V.K., Belchinskaya L.I., Zhabin A.V., Khodosova N.A. Experience in the study of the sorption capacity of mineral formations depending on their composition. *Proceedings of Voronezh State University. Series Geology*. 2008. No. 2. pp. 133–136. (In Russ.)
4. Vinokurov E.G., Zuev K.V., Koldaeva T.Yu., Perevalov V.P., Miroshnikov V.S. Adsorption of zinc phthalocyanine on carbon materials. *Macroheterocycles*. 2017. Vol. 10. No. 4-5. pp. 526–530. DOI: 10.6060/mhc170623v. (In Russ.)
5. Gordina N.E., Prokofev V.Yu., Borisova T.N., Elizarova A.M. Synthesis of granular low-modulus zeolites from metakaolin using mechanochemical activation and ultrasonic treatment. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Himiya i himicheskaya tekhnologiya*. 2019. Vol. 62. Issue. 7. pp. 99–106. DOI: 10.6060/ivkkt201962fp.5725. (In Russ.)
6. Distanov U.G., Konyukhova T.P. Mineral raw materials. *Natural Sorbents*. Moscow. Geoinformmark, 1999. 42 p. (In Russ.)
7. Konyukhova T.P., Distanov U.G. Technological classification of mixed siliceous zeolite-containing rocks. *Prospect of mineral resources*. 2000. No. 9. pp. 45–46. (In Russ.)
8. Melnikov V.B., Fedorova E.B., Makarova N.P., Gafarova E.B. Study of the dynamic adsorption activity of silica gels in gas drying. *Oilfield Business*. 2022. No. 5(641). pp. 51–53. DOI: 10.33285/0207-2351-2022-5(641)-51-53. (In Russ.)
9. Pervov A.G. Modern high-efficiency technologies of drinking and process water purification using membranes, reverse osmosis, nanofiltration, ultrafiltration. Moscow. ACU. 2009. 282 p. (In Russ.)
10. Prokofev V.Y., Gordina N.E., Zakharov O.N., Tsvetova E.V., Kolobkova A.E. Granulated low-modulus zeolites for extraction of Co cations. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Himiya i himicheskaya tekhnologiya*. 2020. Vol. 63. Issue 6. pp. 44–49. DOI: 10.6060/ivkkt.20206306.6144. (In Russ.)
11. Talpa B.V., Agarkov Yu.V., Bardin Yu.Yu. Siliceous rocks - a new raw material base for the construction industry of the North Caucasus. *Exploration and protection of subsoil*. 1992. No. 11. pp. 12–14. (In Russ.)
12. Khardikov A.E. Zeolites of the North Caucasus. Rostov-on-Don. Rostov University Publishing House. 2005. 224 p. (In Russ.)
13. Khardikov A.E., Boiko N.I., Agarkov Yu.V. Zeolites of the Eastern Ciscaucasia and the prospects for their practical use. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. No. 6. 1992. pp. 86–91. (In Russ.)
14. Khramtsova A.P., Prokofev V.Yu., Gordina N.E., Cherednikova D.S., Konstantinova E.M. Thermal behavior of mixturer based on metakaolin for LTA zeolite synthesis. Effect of ultrasonic treatment. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Himiya i himicheskaya tekhnologiya*. 2019. Vol. 62. No. 2. pp. 65–74. DOI: 10.6060/ivkkt.20196202.5702. (In Russ.)
15. Yusupov A.R., Mamaev S.A., Yusupov Z.A., Mamaev A.S., Features of zeolite-containing siliceous-carbonate rocks of Dagestan. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 99–107. (In Russ.)
16. Yusupov A. R., Mamaev S. A., Yusupov Z. A., Mamaev A. S. Zeolite-containing siliceous rocks of Dagestan as an additive for the production of ceramic wollastonite-containing facing tiles. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol.12. No. 4. pp.142–152. (In Russ.)

17. Alekberov Y.Z., Khalilov R.Z., Ismailova X.G. Research and application of natural zeolite in the processes of gas purification and drying. *SOCAR Proceedings Special Issue*. 2021. No. 2. pp. 016–021. (In Russ.)
18. Melnikov V.B., Fedorova E.B., Gafarova E.B. Comparative evaluation of adsorbents for natural gas dehydration at liquefied natural gas plant. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2020. Vol. 56. – pp. 31–35. DOI: 10.1007/s10553-020-01107-9.
19. Prokofiev V.Yu., Gordina N.E., Zakharov O.N., Tsvetova E.V., Kolobkova A.E. Granular low-modulus zeolites for extraction of Co cations. *Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology*. 2020. Vol. 63. Issue 6. pp. 44–49. DOI: 10.6060/ivkkt.20206306.6144.
20. Raso R., Tovar M., Lasobras J., Herguido J., Kumakiri I., Araki S. Comparison of zeolite membranes towards their use in membrane reactors for CO₂ hydrogenation to methanol. *Catalysis Today*. 2020. Vol. 364. pp. 270–275. DOI: 10.1016/j.cattod.2020.03.014.
21. Trifan B., Lasobras J., Soler J. Modifications in the composition of CuO/ZnO/Al₂O₃ catalyst for the synthesis of methanol by CO₂ hydrogenation. *Catalysts*. 2021. Vol. 11. No. 774. DOI: 10.3390/catal11070774.

УДК 553.98

DOI: 10.46698/VNC.2025.21.52.013

Оригинальная статья

Закономерности размещения и условия формирования залежей углеводородов Северо-Донбасского газоносного района

С.В. Сикорская 

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М.И. Платова, Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132,
e-mail: sveta_gor_06@mail.ru

Статья поступила: 01.11.2024, доработана: 05.02.2025, принята к публикации: 07.02.2025

Резюме: В статье на основе комплексного анализа геологической и геохимической информации рассмотрено геологическое строение, история геологического развития Северо-Донбасского газонефтеносного района и проведена типизация открытых залежей углеводородов. **Актуальность работы.** Северо-Донбасский газонефтеносный район расположен на севере Ростовской области. В его пределах открыты газовые, газоконденсатные и нефтяные месторождения. Закономерности размещения и условия формирования залежей углеводородов этого региона не до конца изучены. Результаты исследования могут быть учтены при составлении схемы нефтегазоносности региона и определении первоочередных направлений геологоразведочных работ на нефть и газ. **Цель исследования.** Реконструировать историю геологического развития в контексте нефтегазообразования и нефтегазонакопления, на основе анализа изменчивости геохимических особенностей пластовых флюидов проанализировать закономерности размещения углеводородных скоплений в регионе. **Методы исследования.** Реконструкция процессов нефтегазообразования и нефтегазонакопления осуществлялась путем построения кривых погружения отложений и их сопоставления с установленными ранее схемами глубинной зональности катагенеза РОВ. Обработка геохимических данных осуществлялась методами статистики в программном пакете Statistica. Основными анализируемыми параметрами были углеводородный состав свободного газа, состав растворенного в подземных водах газа, групповой состав нефтей и соотношение пластового давления и давления насыщения. **Результаты исследования.** Была проведена типизация залежей, реконструирована история геологического развития, предложены основные механизмы формирования залежей.

Ключевые слова: континентальный рифтогенез, нефть, свободный газ, газовый конденсат, углеводородный состав газа, групповой состав нефти, пластовое давление, давление насыщения, кривые погружения отложений.

Для цитирования: Сикорская С.В. Закономерности размещения и условия формирования залежей углеводородов Северо-Донбасского газоносного района. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 151-165. DOI: 10.46698/VNC.2025.21.52.013

DOI: 10.46698/VNC.2025.21.52.013

Original paper

The patterns of hydrocarbon deposits distribution and conditions of their formation in the North-Donbass gas and oil-bearing region

S.V. Sikorskaya 

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
132 Prosveshcheniya Str., Novocherkassk 346428, Russian Federation,
e-mail: sveta_gor_06@mail.ru

Received: 01.11.2024, revised: 05.02.2025, accepted: 07.02.2025

Abstract: The article considers the geological structure of The North-Donbass gas and oil-bearing area, its geological history and typification of the discovered hydrocarbon deposits. The base of investigation is a complex analysis of geological and geochemical information. **Relevance.** The North-Donbass gas and oil-bearing region is situated in the north of Rostov region. Gas, oil and gas condensate fields have been discovered within its borders. The patterns of distribution of hydrocarbon deposits and conditions of their formation in this region have not been fully studied. The results can be applied in mapping of oil and gas potential of the region and determining the priority directions of exploration for oil and gas. **Aim.** To reconstruct the geological history in the context of oil and gas formation and accumulation. To analyze the patterns of the location of hydrocarbon accumulations in the region on the base of the analysis of the variability of geochemical features of reservoir fluids. **Methods.** The reconstruction of oil and gas formation and accumulation was carried out by constructing the sediment immersion curves and by their comparison with schemes of deep zonation of the organic matter catagenesis. Geochemical data was analyzed by statistical methods in the software package Statistica. The main analyzed parameters were the hydrocarbon composition of free gas, the composition of dissolved gas, the group composition of oils, and the ratio of reservoir pressure to saturation pressure. **Results.** Hydrocarbon deposits of the region were typified, the geological history was reconstructed, and the main mechanisms of deposit formation were proposed.

Keywords: continental rifting, oil, free gas, gas condensate, hydrocarbon composition of gas, group composition of oil, reservoir pressure, saturation pressure, sediment immersion curves.

For citation: Sikorskaya S.V. The patterns of hydrocarbon deposits distribution and conditions of their formation in the North-Donbass gas and oil-bearing region. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (In Russ.). 2025. 15(1): 151-165. DOI: 10.46698/VNC.2025.21.52.013

Введение

Наращивание сырьевой базы нашей страны всегда имело стратегический характер. Решение этой задачи может быть осуществлено только за счет постоянного и последовательного характера геологоразведочного процесса, теоретической основой которого должны быть представления о строении и геологическом развитии территории.

Приоритет запасов УВ за счет поисков и оценки новых объектов становится все более сложной задачей. Наряду с этим в России остаются районы, перспективны нефтегазонасности которых не до конца изучены. Таковым является Северо-Донбасский газонефтеносный район (ГНР), в соответствии с общепринятым нефтегазогеологическим районированием выделенный в составе Днепровско-Донецкой газонефтяной области Днепровско-Припятской газонефтяной провинции

[Максимов, 1987]. Он расположен на севере Ростовской области и частично – на территории Луганской Народной Республики. Изучение его перспектив нефтегазоносности было начато еще в первой половине прошлого века. Значительный вклад в изучение нефтегазоносности Ростовского сектора Северо-Донбасского ГНР внесли С.В. Вальбе, Е.В. Мовшович, М.Л. Хацкель, В.А. Бобух, В.С. Назаренко, А.Н. Резников, Ю.И. Холодков и др. В результате были выделены основные перспективные комплексы: кора выветривания докембрийского фундамента и карбонатный комплекс нижнего и среднего карбона [Бобух, 2005].

Развитие угольной промышленности региона несправедливо явилось причиной снижения интереса к перспективам нефтегазоносности территории. Распад Советского Союза и нахождение Северо-Донбасского ГНР по разные стороны от государственной границы осложнило дальнейшее изучение, фактически полностью отсутствовала возможность объективного сопоставления геологических, геофизических и геохимических характеристик нефтегазоносных объектов, так необходимых для системного подхода к изучению закономерностей размещения и условий формирования залежей УВ в регионе.

Изучением тектонического строения и развития Днепровско-Донецкой впадины, представляющей в каменноугольное время единый с территорией Северо-Донбасского ГНР бассейн осадконакопления, занимались и западные ученые [Stovba et al., 2003; Saintot et al., 2003; Stovba et al., 2024; Sachsenhofer, 2010; Stephenson et al., 2012].

Помимо этого, необходимо учитывать, что имеющиеся исследования в области нефтегазоносности региона в основном базировались на геосинклинальной теории развития земной коры. Оценка перспектив нефтегазоносности Северо-Донбасского ГНР с позиции тектоники литосферных плит фактически не осуществлялась, в то время как этот подход кардинально меняет концепцию геологического развития региона.

Современные исследования региональной геологии и геодинамической активности региона [Granovsky, 2018; Юдин, 2003] являются основой при реконструкции истории геологического развития и этапов формирования региона как газонефтеносного.

Методы исследования

Выявление закономерностей размещения углеводородных скоплений Северо-Донбасского ГНР, расположенного на стыке двух крупных нефтегазоносных провинций, осуществлялось, главным образом, посредством реконструкции истории геологического развития региона в контексте нефтегазообразования и нефтегазоаккумуляции, анализа географии месторождений УВ, а также сопоставления физико-химических свойств пластовых флюидов.

Были построены кривые погружения отложений основных тектонических элементов Северо-Донбасского ГНР и прилегающих территорий и проведено их сопоставление с установленными ранее схемами глубинной зональности катагенеза РОВ. Кривые погружения были построены по данным стратиграфических разрезов, представленных в фондовых материалах, а также в опубликованных источниках.

При сопоставлении физико-химических свойств пластовых флюидов были учтены результаты анализа 48 проб нефти, 42 проб свободного газа и 24 проб пластовых вод нефтегазоносных отложений. Результаты исследований проб пластовых флюидов Северо-Донбасского ГНР и Нижневолжской НГО были взяты из фондовых отчетов, Днепровско-Донецкой впадины – из опубликованных справочных ма-

териалов. Обработка данных осуществлялась методами статистики в программном пакете Statistica (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Исходные данные для анализа состава и свойств пластовых флюидов/
Initial data for the analysis of the composition and properties of reservoir fluids**

Объект НГГ-районирования/ The object of oil and gas geological zoning	Количество анализов, участвующих в сопоставлении/ The number of analyses involved in the comparison		
	Групповой состав нефти/ Group composition of oil	Состав свободного газа/ Composition of free gas	Состав растворенного в подземных водах газа/ Composition of gases dissolved in groundwater
Северо-Донбасский ГНР/ the North-Donbass gas and oil bearing region	14	9	12
Нижеволжская НГО/ the Nizhnevolzhskaya oil and gas bearing area	30	14	4
Днепро-Донецкая впадина/ the Dnieper-Donets basin	4	19	8

Результаты исследований и их обсуждение

В тектоническом отношении Северо-Донбасский ГНР расположен в пределах Преддонецкой ступени, Междувдвиговой зоны и Преддонецкого прогиба (рис. 1). Преддонецкая ступень и Преддонецкий прогиб являются структурами Южного склона Воронежской антеклизы (ЮСВА), Междувдвиговая зона – частью Донецкого складчатого сооружения.

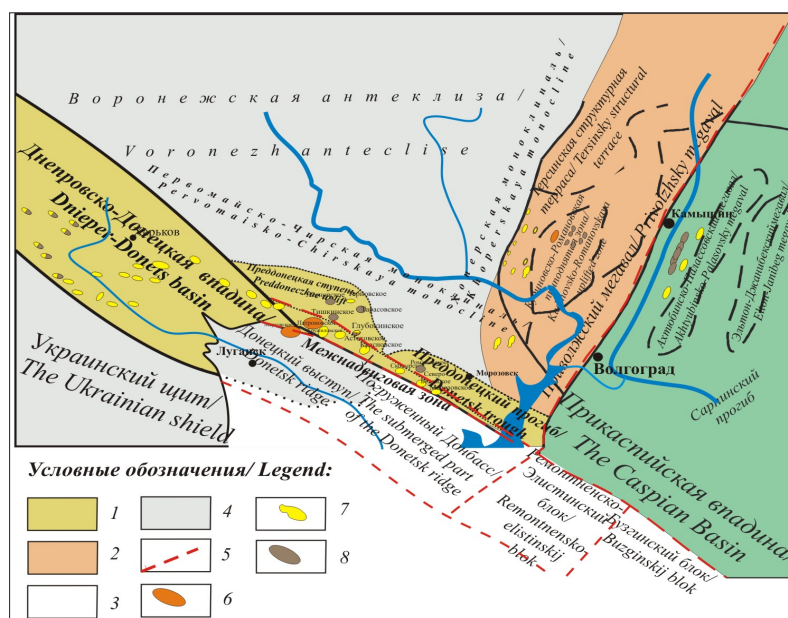


Рис. 1. Схема нефтегазогеологического районирования зоны сочленения Воронежской антеклизы и Днепровско-Каспийской рифтовой зоны. Условные обозначения: 1 – Днепровско-Припятская ГНП, 2 – Волго-Уральская НГП, 3 – территории неясных перспектив, 4 – бесперспективные территории, 5 – крупные дизъюнктивные нарушения, 6 – газоконденсатные месторождения, 7 – газовые месторождения, 8 – нефтяные месторождения /

Fig. 1. Scheme of oil and gas geological zoning of the junction zone of the Voronezh anticline and the Dnieper-Caspian rift zone. Legend: 1 – the Dnieper-Prityat gas and petroleum province, 2 – the Volga-Ural petroleum and gas province, 3 – territories with unclear prospects, 4 – unpromising territories, 5 – major faults, 6 – gas condensate fields, 7 – gas fields, 8 – oil fields

При рассмотрении истории геологического развития и условий формирования имеющихся в регионе залежей УВ необходимо учитывать, что Донецкое складчатое сооружение на западе граничит с Днепровско-Донецкой впадиной, на востоке переходит в кряж Карпинского. Все три геоструктурных элемента следует рассматривать как части единой Днепровско-Каспийской системы [Хаин и др., 2009]. Формирование этой системы было связано с проявлением процессов континентального рифтогенеза, происходящего между Воронежской антеклизой и Украинским щитом.

Процессы осадконакопления сначала начались в пределах северного борта Днепровско-Донецкой впадины. Подтверждением этого является наличие в разрезе осадочного чехла отложений девонского возраста. В пределах современного Донбасса процессы осадконакопления начались позже, в раннекаменноугольное время.

В среднекаменноугольное время Днепровско-Каспийская система представляла собой крупный прогиб с мелководно-морским режимом, интенсивность процессов ее прогибания была значительная, что подтверждается километровыми мощностями каменноугольных отложений. Наиболее стремительные трансгрессионные процессы отмечались в пределах Днепровско-Донецкой впадины. Для территории современного Донбасса в каменноугольном периоде было характерно одномоментное существование процесса погружения области осадконакопления и процесса воздымания области сноса терригенного обломочного материала, каковым являлись кластические осадки органического состава, в дальнейшем превращенные в ископаемые угли [Троценко, 2017]. Таким образом, каменноугольные отложения региона представляют собой мощную толщу карбонатных пород с высоким содержанием сапропелевого органического вещества (ОВ), чередующуюся с континентальными отложениями, содержащими преимущественно гумусовое ОВ.

В среднепермское время силы сжатия сменили режим рифтогенеза, Воронежская антеклиза и Украинский щит начали сближаться, в результате чего был сформирован Складчатый Донбасс. Западная часть Днепровско-Каспийской системы практически оставалась дивергентной зоной. Активизация Складчатого Донбасса продолжалась и в мезозое, проявляясь в тектоно-магматических процессах [Парада, 2023].

Таким образом, в каменноугольный период Днепровско-Донецкая впадина, а также территории, соответствующие Донецкому складчатому сооружению и кряжу Карпинского, были единым бассейном осадконакопления. Образование мелководно-морских отложений, благоприятных для формирования потенциально нефтегазоматеринских пород, было характерно для северного борта этой палеовпадины, которому соответствовали как территория Межнадвиговой зоны, так и территория Северного борта Днепровско-Донецкой впадины.

Основная часть месторождений УВ Северо-Донбасского ГНР открыта в Межнадвиговой зоне складчатого Донбасса. Этот геоструктурный элемент характеризуется относительно спокойным залеганием осадочных толщ и представляет собой узкую полосу юго-восточного простирания, которая на юге отделена Главным надвигом от Донецкого складчатого сооружения, на севере – Северо-Донецким (Глубокинским) надвигом от Преддонецкой ступени и Преддонецкого прогиба. Для Межнадвиговой зоны характерно моноклинальное залегание осадочного чехла, осложненное локальными структурами и дизъюнктивными нарушениями [Геология СССР, 1958, 1968].

В этой зоне открыты Кружиловское, Астаховское, Скосырское, Северо-Белянское, Морозовское газовые, Марковское, Патроновское газоконденсатные месторождения. В совокупности с месторождениями Рябухинско-Северо-Голубовского газоносного района, расположенного в юго-восточной части Северной прибортовой зоны Днепровского грабена, месторождения Межнадвиговой зоны образуют единый газоносный тренд юго-восточного направления.

В пределах Преддонецкой ступени открыты Леоновское, Тишкинское, Тарасовское нефтяные и Терновское газовое месторождения. В отличие от первых трех месторождений, где продуктивными являются отложения башкирского яруса, залежи Терновского месторождения приурочены к верейскому C_{2vt} горизонту московского яруса и располагаются на гипсометрически значительно более высоких отметках.

В ходе палеотектонического анализа изучаемой территории на основе опубликованных данных [Портная и др., 1978] были построены графики погружения отложений основных тектонических элементов Северо-Донбасского ГНР и прилегающих территорий (рис. 2 и рис. 3).

Сравнение графиков погружения каменноугольных отложений Преддонецкой ступени и Межнадвиговой зоны (рис. 2) свидетельствует о схожести картины геологического развития, разница глубин погружения одновозрастных отложений составляет в целом 500–600 м. Степень катагенетического преобразования каменноугольных отложений Преддонецкой ступени в большей степени соответствует градации катагенеза $МК_1$, в то время как Межнадвиговой зоны – $МК_2$, что в свою очередь свидетельствует о погружении вмещающих залежи отложений на глубины главной зоны нефтеобразования.

Перерыв в осадконакоплении и анализ истории геологического развития региона в целом косвенно указывает, что предпосылок для погружения исследуемых отложений до глубин главной зоны газообразования не было. Аналогичный вывод можно сделать при рассмотрении графиков погружения каменноугольных отложений северного борта и его восточной части Днепровско-Донецкой впадины, для которых характерно наличие исключительно газовых месторождений (рис. 2). Главная зона газообразования среднекаменноугольными отложениями была достигнута только в центральной части Днепровско-Донецкой впадины и, вероятно, в прогибе, соответствующем современным территориям Донецкого складчатого сооружения и его восточного продолжения.

Тектонические процессы раннепермского времени обусловили деформацию осадочных толщ. В пределах Донецкого складчатого сооружения эти толщи были деформированы в высокоамплитудные складки, осевые части которых в дальнейшем были денудированы, а имеющиеся на тот момент залежи углеводородов – разрушены. Поэтому зоны крупных и линейных складок складчатого Донбасса являются бесперспективными на нефть и газ.

Преддонецкий прогиб расположен северо-восточнее Межнадвиговой зоны. В его пределах открыто Романовское месторождение, нефтеносность которого установлена в отложениях черемшанского C_{2st} горизонта верхнебашкирских отложений. По графикам погружения среднекаменноугольных отложений было установлено, что потенциально материнские породы были погружены до глубин, соответствующих грациям катагенеза $МК_1$ – $МК_2$, и с начала позднекаменноугольного времени находятся в пределах главной зоны нефтеобразования (рис. 3).

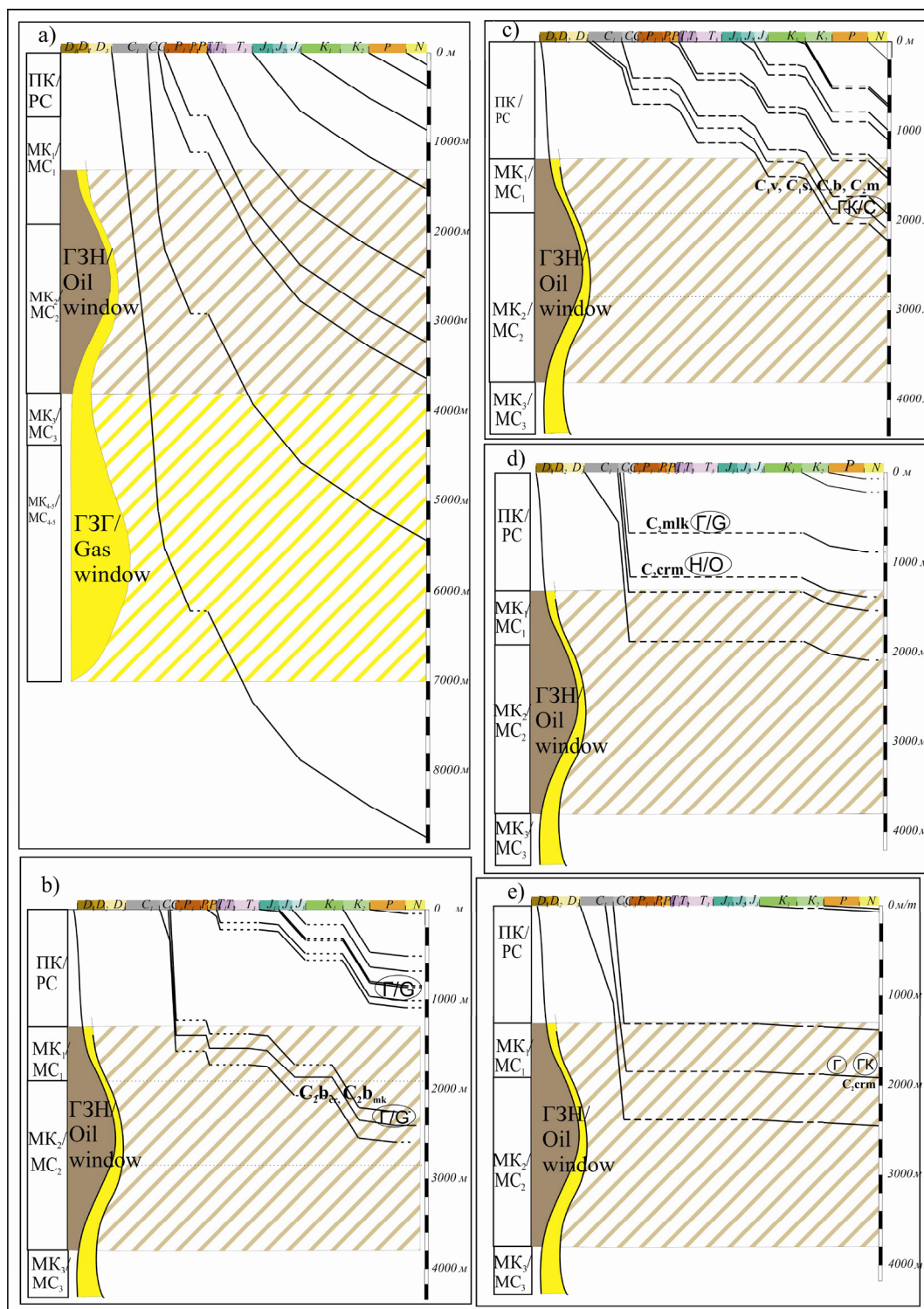


Рис. 2. Графики погружения отложений зоны сочленения Северо-Донбасского ГНР и Днепровско-Донецкой впадины: а) Центральная часть Днепровско-Донецкой впадины, б) Восточная часть северного борта Днепровско-Донецкой впадины, с) Северный борт Днепровско-Донецкой впадины, д) Преддонецкая ступень (Миллеровское поднятие), е) Межнадвиговая зона /

Fig. 2. The sediment immersion curves of the junction zone of The North-Donbass gas and oil-bearing area and the Dnieper-Donets basin: a) The central part of the Dnieper-Donets basin, b) The eastern part of the northern side of the Dnieper-Donets basin, c) The northern side of the Dnieper-Donets basin, d) The Preddoneczkoe (Millerovskoe) uplift, e) The Mezhnadvigovaya zone

Все части Северо-Донбасского ГНР, и Преддонецкая ступень, и Межнадвиговая зона, и Преддонецкий прогиб имели общую геологическую историю вплоть до начала формирования Донецкого складчатого сооружения. Затем для Преддонецкой ступени, как и для Межнадвиговой зоны был характерен регрессионный режим, проявившийся в длительном перерыве осадконакопления (рис. 2), в то время как Преддонецкий прогиб и в пермское, и в раннетриасовое время продолжал оставаться областью трансгрессии, что подтверждается накоплением мощной осадочной толщи (рис. 3). Таким образом, сформированные ранее залежи углеводородов всего Северо-Донбасского ГНР с началом формирования Донецкого складчатого сооружения оказались в новых термобарических условиях.

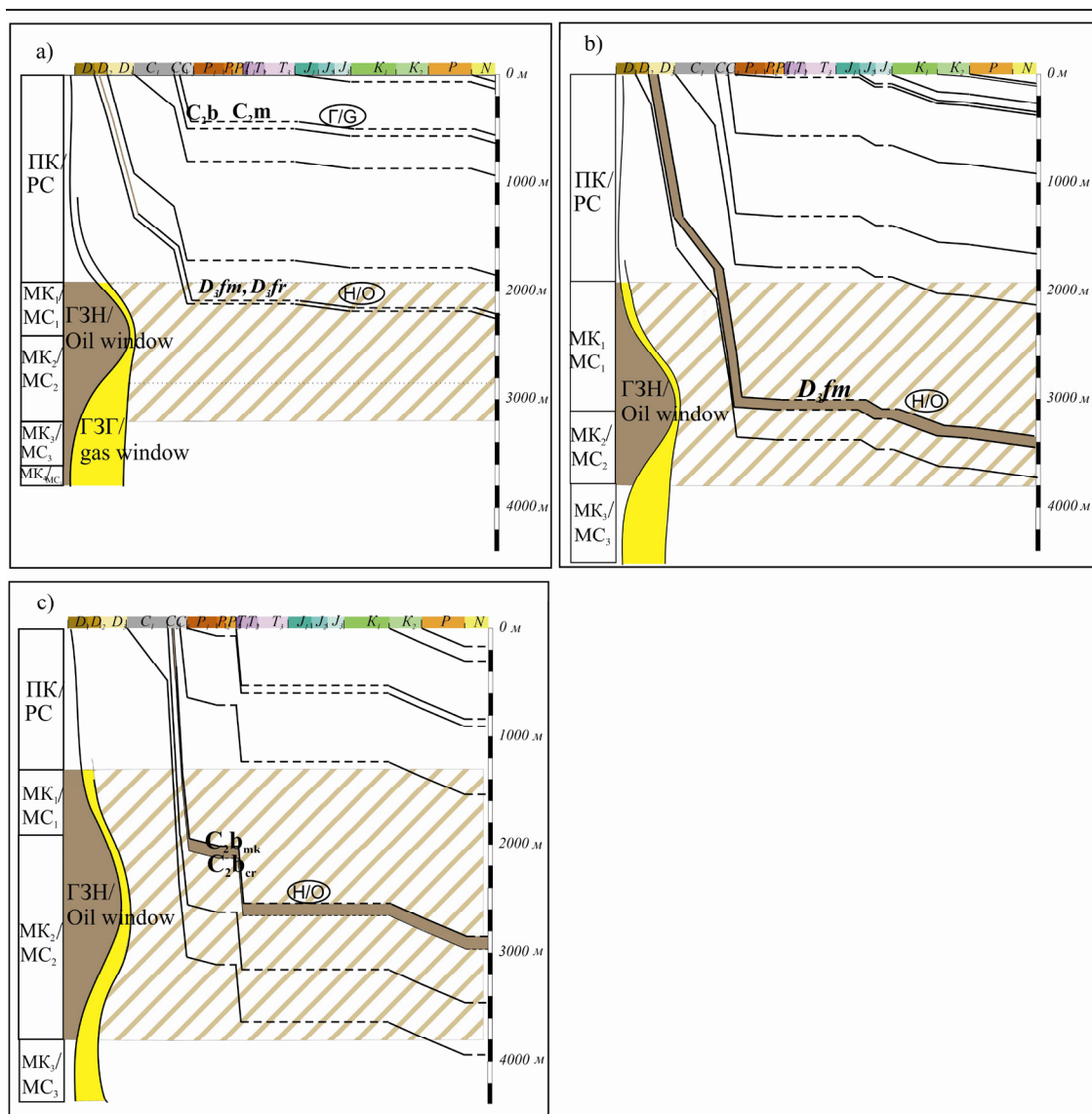


Рис. 3. Графики погружения отложений зоны сочленения Северо-Донбасского ГНР и Нижневолжской НГО: а) Арчединско-Донской сложный вал, б) Кудиновско-Романовская структурная терраса, в) Преддонецкий прогиб /

Fig. 3. The sediment immersion curves of the junction zone of the North-Donbass gas and oil-bearing area and the Nizhnevolzhskaya oil and gas bearing area: а) The Archedinsko-Donskoy complex lifting, б) The Kudinovsko-Romanovskaya structural terrace, в) The Donetsk trough

Преддонецкий прогиб на северо-востоке переходит в Хоперскую моноклинали и Арчединско-Донской сложный вал Юго-восточного склона Воронежской антеклизы, которые с позиции нефтегазогеологического районирования относятся к Нижневолжской нефтегазоносной области. Здесь необходимо уточнить, что в пределах Волгоградского Правобережья основными нефтегазоносными комплексами являются ниже-среднедевонский терригенно-карбонатный и карбонатный нижнекаменноугольный, приуроченный к отложениям турнейского и визейского ярусов.

Примечательным фактом является то, что в пределах Арчединско-Донского сложного вала наряду с отложениями указанных нефтегазоносных комплексов, продуктивными являются отложения среднекаменноугольного возраста, стратиграфический диапазон газоносности схож с месторождениями Преддонецкой ступени, в частности с Терновским месторождением, а также Межнадвиговой зоны. Так, отложения каширского $C_2k\check{s}$ горизонта являются продуктивными на Арчединском месторождении, верейского $C_2vг$ горизонта – на Саушинском, Арчединском и Шляховском месторождениях. Также продуктивными являются отложения мелекесского C_2mk и черемшанского $C_2\check{c}m$ горизонтов башкирского яруса [Газовые месторождения СССР, 1968].

Графики погружения отложений Арчединско-Донского сложного вала свидетельствуют о том, что среднекаменноугольные отложения в пределах этого геоструктурного элемента находятся в зоне протокатагенеза, они не были погружены даже до ГЗН (рис. 3), что позволяет сделать вывод о миграционной природе накопленных УВ газов. Нефтеносные отложения девонского возраста погружены также только до глубин ГЗН. Необходимо подчеркнуть, что газоносность отложений башкирского и московского ярусов в пределах Волгоградского Поволжья характерна только для Арчединско-Донского сложного вала (рис. 1).

Информативным инструментарием для определения взаимосвязи месторождений УВ Северо-Донбасского ГНР с залежами сопредельных территорий является анализ и сопоставление физико-химических свойств пластовых флюидов. В ходе исследования по фондовым и опубликованным данным [Газовые и газоконденсатные месторождения, 1983; Газовые месторождения СССР, 1968, Нефти СССР, Т. II, Т. III, 1972] были сопоставлены углеводородный состав пластовых газов газовых залежей, групповой состав нефтяных залежей, а также состав растворенных газов пластовых вод.

Газы газовых залежей Северо-Донбасского ГНР можно разделить на две группы: полужирные со значительным содержанием CO_2 и сухие с высоким содержанием N_2 . Первая группа характерна для залежей башкирского яруса (черемшанский $C_2\check{c}m$, мелекесский C_2mk горизонты) Межнадвиговой зоны (Глубокинское, Грачиское, Северо-Белянское, Скосырское месторождения), вторая группа свойственна залежам верейского $C_2vг$ горизонта московского яруса Терновского месторождения, расположенного в пределах Преддонецкой ступени (рис. 4).

Газы северного борта Днепровско-Донецкого прогиба тоже характеризуются в основном высоким содержанием азота, низким содержанием углекислого газа, по степени жирности – как сухие, так и полужирные. Для центральной части Днепровско-Донецкого прогиба характерно более низкое содержание азота, вариации коэффициента жирности УВ газов также носят спорадический характер. При этом необходимо признать, что выборка данных по данному региону осуществлялась

исключительно по опубликованным источникам. Можно предположить, что включение в сравнение результатов анализа состава газов из фондовых материалов позволило бы получить более информативную картину.

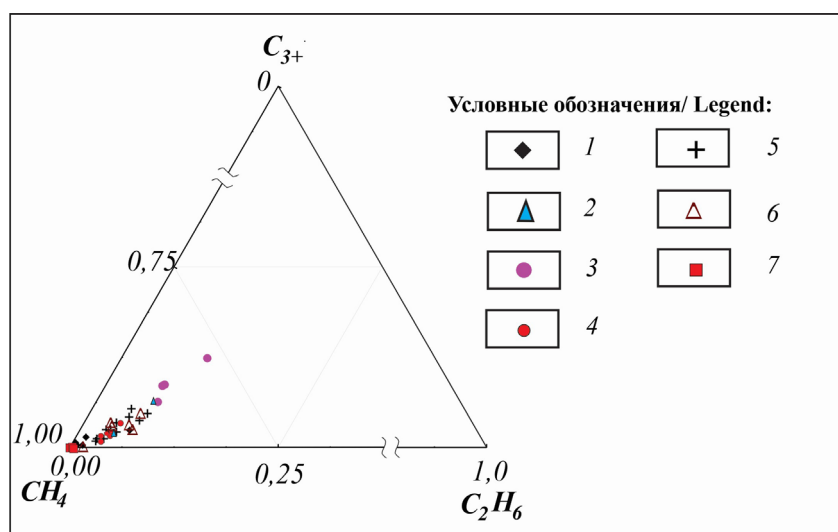


Рис. 4. Треугольная диаграмма углеводородного состава газа Северо-Донбасского ГНР и прилегающих территорий. Условные обозначения: 1 – ЮВСВА, верейский C_{2vr} горизонт; 2 – ЮВСВА, бобриковский C_{1bb} горизонт, 3 – ЮВСВА, девонские отложения, 4 – Центральный грабен Днепровско-Донецкой впадины, пермские отложения, 5 – Восточная часть Днепровско-Донецкой впадины, среднекаменноугольные отложения, 6 – Северо-Донбасский ГНР, среднекаменноугольные отложения, 7 – Северо-Донбасский ГНР, верейский C_{2vr} горизонт (Терновское месторождение) /

Fig. 4. Triangular diagram of the hydrocarbon composition of the gas of the North-Donbass gas and oil-bearing area and adjacent territories. Legend: 1 – The southeastern slope of the Voronezh anteclise, Vereysky C_{2vr} horizon, 2 – The southeastern slope of the Voronezh anteclise, Bobrikovsky C_{1bb} horizon, 3 – The southeastern slope of the Voronezh anteclise, Devonian deposits, 4 – The Central graben of the Dnieper-Donets basin, Permian deposits, 5 – The Eastern part of the Dnieper-Donets basin, Middle carboniferous deposits, 6 – The North-Donbass gas and oil-bearing area, Middle carboniferous deposits, 7 – The North-Donbass gas and oil-bearing area, Vereysky C_{2vr} horizon (Ternovskoye gasfield) /

Газы газовых залежей западной части Нижневолжской НГО также можно разделить на две большие группы, дифференциация которых очевидна не по тектонической, а по стратиграфической принадлежности.

Первая группа характерна для газовых залежей карбонатной толщи верхнедевонских–нижнекаменноугольных отложений. Газы характеризуются низким содержанием CO_2 , и N_2 и высоким содержанием гомологов метана, коэффициент жирности в среднем колеблется от 9 до 18 %.

Другая группа УВ газов характерна для упомянутых выше залежей верейского C_{2vr} горизонта Арчединско-Донского сложного вала, где литолого-стратиграфический комплекс идентичен газоносному комплексу Северо-Донбасского района. Состав газа этих залежей фактически идентичен УВ составу одновозрастных залежей Терновского месторождения (рис. 4).

Результаты сопоставления свойств нефтей сравниваемых геоструктурных зон не являются столь информативными и однозначными. В целом, по групповому составу нефти и Днепровско-Донецкой ГНО, и Северо-Донбасского ГНР, и Нижневолжской НГО характеризуются как метановые и относятся к наиболее распространенному типу нефтей земного шара (рис. 5).

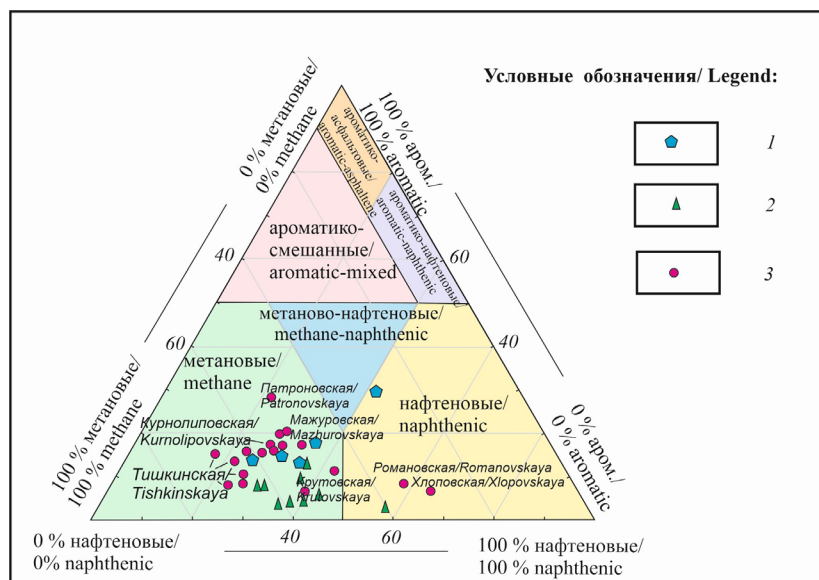


Рис. 5. Треугольная диаграмма компонентного состава нефтей Северо-Донбасского ГНР и прилегающих территорий. Условные обозначения: 1 – Пробы нефтей Днепровско-Донецкой ГНО, 2 – Пробы нефти Нижневолжской НГО, 3 – Пробы нефти Северо-Донбасского ГНР /

Fig. 5. Triangular diagram of the component composition of oil fields of the North-Donbass gas and oil-bearing area and adjacent territories. Legend: 1 – Oil samples of the Dnieper-Donets basin, 2 – Oil samples of the Nizhnevolzhskaya oil and gas bearing area, 3 – Oil samples of the North-Donbass gas and oil-bearing area

Нефти месторождений Днепровско-Донецкой ГНО, как и Северо-Донбасского ГНР, характеризуются высокими значениями газосодержания и близкими значениями давления насыщения и пластового давления. Многие залежи Северо-Донбасского ГНР характеризуются как газоконденсатные. В то же время нефтенасыщенные пласты с высоким газосодержанием и сравнительно близкими значениями давлений насыщения и гидростатического давления интерпретируются как пласты газоконденсатных залежей и наоборот.

На треугольной диаграмме группового состава нефтей обособленно расположены пробы нефти Романовского месторождения и Хлоповской структуры (рис. 5). Объяснением такой особенности является различие в условиях геологического развития этих зон в период активного формирования Донецкого складчатого сооружения. Для Преддонецкой ступени, испытывающей с раннепермского времени регрессию, было характерно снижение пластовых давлений и температур, что способствовало активному высвобождению растворенных в нефти газов и переформированию нефтяных залежей с образованием вторичных газовых и газоконденсатных скоплений. Преддонецкий прогиб продолжал испытывать трансгрессию, которая сопровождалась ужесточением термобарических условий и поступлением новых порций пластовых флюидов из разрушенных в пределах формируемого на тот момент Донецкого складчатого сооружения залежей.

Анализ состава газов пластовых вод среднекаменноугольных отложений показал схожесть их УВ состава и состава, имеющих в регионе газовых залежей (рис. 6). В целом газы подземных вод Днепровско-Донецкой ГНО и Северо-Донбасского ГНР характеризуются как полужирные и в меньшей степени как сухие.

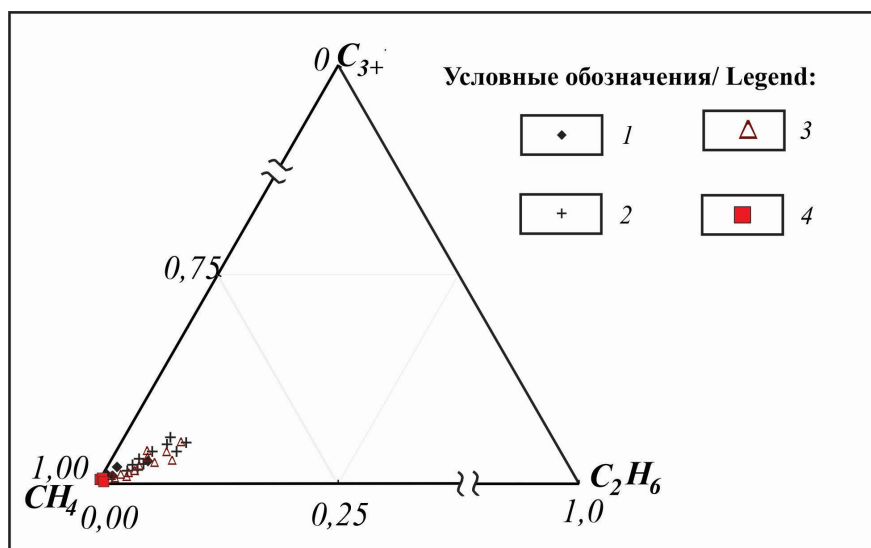


Рис. 6. Треугольная диаграмма углеводородного состава растворенного в подземных водах газа Северо-Донбасского ГНР и прилегающих территорий.

Условные обозначения: 1 – Юго-восточный склон Воронежской антеклизы, верейский C_{2vr} горизонт, 2 – Восточная часть Днепровско-Донецкой впадины, среднекаменноугольные отложения, 3 – Северо-Донбасский ГНР, среднекаменноугольные отложения, 4 – Северо-Донбасский ГНР, верейский C_{2vr} горизонт (Терновское месторождение) /

Fig. 6. Triangular diagram of hydrocarbon composition of gas dissolved in groundwater of the North-Donbass gas and oil-bearing area and adjacent territories.

Legend: 1 – The southeastern slope of the Voronezh antecline, Vereysky C_{2vr} horizon, 2 – the Eastern part of the Dnieper-Donets basin, Middle carboniferous deposits,

3 – the North-Donbass gas and oil-bearing area, Middle carboniferous deposits,

4 – the North-Donbass gas and oil-bearing area, Vereysky C_{2vr} horizon (Ternovskoye gasfield)

Близкие значения пластовых давлений и давлений насыщения в совокупности со схожим компонентным составом растворенных в подземных водах газов и свободного газа открытых месторождений свидетельствуют о том, что газовые залежи были сформированы в результате выделения газов из подземных вод. В то же время насыщенные газами нефти при попадании в условия более низких пластовых давлений, начинают выделять свободный газ, формируя также залежи свободного газа.

Таким образом, активное формирование углеводородов в пределах Днепровско-Каспийской системы имело место с начала позднекаменноугольного периода. В это время в пределах территории, соответствующей современному складчатому Донбассу, отложения среднего карбона находились на глубинах главной зоны нефтеобразования. В пермское время за счет активизации тангенциальных движений образовалось Донецкое складчатое сооружение, произошло разрушение имеющихся залежей и перемещение нефти в другие термобарические условия. За счет снижения пластовых давлений до давления насыщения в ряде залежей Межнадвиговой зоны и Преддонецкой ступени произошла дифференциация пластовых флюидов. Ужесточение термобарических условий и поступление новых порций УВ в пределах Преддонецкого прогиба послужило причиной формирования залежей нефтей, отличающихся по своим свойствам от других нефтей региона.

Предложенный механизм формирования залежей объясняет одновременное наличие в разрезе башкирского яруса и нефтяных, и газовых, и газоконденсатных залежей. В то же время нельзя исключать и генерацию углеводородов *in situ*.

В отличие от территории складчатого Донбасса Днепровско-Донецкий прогиб и территория кряжа Карпинского испытывали активное погружение на протяжении практически всей дальнейшей геологической истории, что способствовало формированию условий активной газогенерации. Углеводородные газы являются крайне подвижными флюидами, способными мигрировать на большие расстояния.

Особый интерес представляет изучение условий формирования газовых залежей московского яруса, открытых в пределах Преддонецкой ступени, а также Арчединско-Донского сложного вала, т.е. на южном и юго-восточном склонах Воронежской антеклизы. Несмотря на тектоническую принадлежность к платформенной структуре, генетически эти залежи в большей степени связаны с Днепровско-Каспийской рифтовой зоной, в пределах которой существовали условия для образования газов в указанных отложениях. Сухой характер состава газа может указывать на внутрипластовую миграцию газа по принципу дифференциального улавливания. Если предположить, что первоначально газовый поток представлял собой смесь УВ газов, то по направлению его движения первые ловушки были заняты более подвижными гомологами метана, а метан продолжал мигрировать на большие расстояния, достигая ловушек Преддонецкой ступени и Арчединско-Донского сложного вала.

Выводы

Из вышесказанного следует, что месторождения углеводородов Северо-Донбасского ГНР генетически связаны с Днепровско-Каспийской рифтовой системой, которая в схемах современного тектонического районирования не выделяется как единый геоструктурный элемент. Однако в разрезе геологического прошлого, когда происходило накопление материнских пород и реализовывался их материнский потенциал, очевидна взаимосвязь Северо-Донбасского ГНР с Днепровско-Донецким прогибом и кряжем Карпинского, а также частично с юго-восточным склоном Воронежской антеклизы, в каменноугольное время также являющимся единым с Днепровско-Каспийской рифтовой системой бассейном осадконакопления.

Однозначным выводом проведенных исследований является перспективность нефтегазоносности Северо-Донбасского ГНР. На этой территории выделяются и заведомо бесперспективные территории (территория складчатого Донбасса и его погруженной части), и оставленные без должного внимания районы, в том числе территория Преддонецкого прогиба и смежной Хоперской моноклинали.

Литература

1. Бобух В.А. Геология и перспективы нефтегазоносности Волго-Донского региона: дис. в форме научного доклада ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.12 / Бобух Виктор Андреевич. – Ростов-на-Дону: РГУ, 2005. – 71 с.
2. Газовые и газоконденсатные месторождения: справочник. / Под ред. И.П. Жабреву. – М.: Недра, 1983. – 373 с.
3. Газовые месторождения СССР: справочник. / Под редакцией В.Г. Васильев. – М.: Недра, 1968. – 688 с.
4. Геология СССР. Том 46. Геологическое описание Ростовской, Волгоградской, Астраханской областей и Калмыкской ССР. Часть 1. Геологическое описание. / Под редакцией Ф.А. Белов, А.И. Егоров, Н.И. Погребнов. – М.: Недра, 1969. – 666 с.
5. Геология СССР. Том 5. Геологическое описание Украинской и Молдавской ССР. Часть 1. Геологическое описание. / Под редакцией П.Я. Антропов, В.А. Ершов, Н.П. Семененко. – М.: Недра, 1958. – 1000 с.

6. Давыденко Д.Б., Гамбург К.Ю. Глубинное строение зоны сочленения Донецкой складчатой системы и Воронежского кристаллического массива по геофизическим данным. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 28–38. DOI: 10.46698/VNC.2024.24.93.004.
7. Нефти СССР: Справочник в четырех томах. Том II. Нефти среднего и нижнего Поволжья. / Под редакцией З.В. Дриацкая, М.А. Мхчян, Н.М. Жмыхова и др. – М.: Химия, 1972. – 392 с.
8. Нефти СССР: Справочник в четырех томах. Том III. Нефти Кавказа и западных районов Европейской части СССР. / Под редакцией Г.Г. Ашумов, Е.С. Левченко, А.С. Журба и др. – М.: Химия, 1972. – 616 с.
9. Нефтяные и газовые месторождения СССР: справочник. Книга I. Европейская часть СССР. / Под редакцией С.П. Максимов. – М.: Недра, 1987 – 258 с.
10. Парада С.Г. Геодинамические обстановки формирования рудно-магматических систем Восточного Донбасса по петрохимическим данным. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 122–132. DOI: 10.46698/VNC.2023.87.15.009.
11. Портная Е.Л., Цейслер В.М., Чернова Е.С. Стратиграфические колонки чехла Восточно-Европейской платформы: учебное пособие. М.: МГРИ, 1978. – 68 с.
12. Тектоника южного обрамления Восточно-Европейской платформы. / Объяснительная записка к тектонической карте Черноморско-Каспийского региона. Масштаб 1:2 500 000. / Под редакцией В.Е. Хаина, В.И. Попкова. – Краснодар: КубГУ, 2009. – 213 с.
13. Трощенко В.В. Цикличность угленакопления и геотектоника. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2017. – № 1. – С. 73–80. DOI: 10.23671/VNC.2017.1.9480.
14. Юдин В.В. Геодинамика Южного Донбасса: монография. К.: УкрГГРИ, 2003. – 92 с.
15. Granovsky A.G. Magmatism and stages of the tectonic evolution in the Donets folded structure, Eastern Donets basin. // *Geotectonics*. – 2018. – Vol. 52. No. 4. – pp. 485–498. DOI: 10.1134/S0016852118040039.
16. Sachsenhofer R.F., Shymanovskyy V.A., Bechtel A., Gratzner R., Horsfield B., Reischenbacher D. Palaeozoic source rocks in the Dniepr-Donets Basin, Ukraine. // *Petroleum Geoscience*. – 2010. – Vol. 16. – pp. 377–399. DOI: 10.1144/1354-079309-032.
17. Saintot A., Stephenson R., Stovba S., Maystrenko Yu. Structures associated with inversion of the Donbas Foldbelt (Ukraine and Russia). // *Tectonophysics*. – 2003. – Vol. 373. – pp. 181–207. DOI: 10.1016/S0040-1951(03)00290-7.
18. Stovba S.M., Maystrenko Yu. P., Stephenson R.A., Kusznir N.J. The formation of the south-eastern part of the Dniepr-Donets Basin: 2-D forward and reverse modeling taking into account post-rift redeposition of syn-rift salt. // *Sedimentary geology*. – 2003. – Vol. 156. Issue 1. – pp. 11–33. DOI: 10.1016/S0037-0738(02)00280-4.
19. Stovba S., Khriashchevska O., Mazur S., Stephenson R., Vengrovych D., Drachev S. Hydrocarbon prospects in the Dniepr-Donets Basin, Ukraine, and the Ukrainian Carpathians: an overview. // *Annales Societatis Geologorum Poloniae*. – 2024. – Vol. 94. – pp. 111–137. DOI: 10.14241/aspg.2024.07.
20. Stephenson R.A., Stovba S.M. The Dniepr-Donets Basin. // *Regional Geology and Tectonics: Phanerozoic Rift Systems and Sedimentary Basins*. – 2012. – Vol. 1. – pp. 421–441. DOI: 10.1016/B978-0-444-56356-9.00015-8.

References

1. Bobuh V.A. Geology and prospects of oil and gas potential of the Volga-Don region. Dissertation in the form of a scientific report of Dr. Geol.-mineral. Sci. Rostov-on-Don. RSU. 2005. 71 p. (In Russ.).
2. Gas and gas condensate fields. Reference book. Ed. I.P. Zhabrev. Moscow. Nedra. 1983. 373 p. (In Russ.).
3. Gas fields of the USSR. Reference book. Ed. V.G. Vasiliev. Moscow. Nedra. 1968. 688 p. (In Russ.).

4. Geology of the USSR. Vol. 46. Geological description of the Rostov, Volgograd, Astrakhan regions and the Kalmyk SSR. Part 1. Geological description. Eds. F.A. Belov, A.I. Egorov, N.I. Pogrebnov. Moscow. Nedra. 1969. 666 p. (In Russ.)
5. Geology of the USSR. Vol. 5. Geological description of the Ukrainian and Moldavian SSR. Part 1. Geological description. Eds. P.Ya. Antropov, V.A. Ershov, N.P. Semenenko. Moscow. Nedra. 1958. 1000 p. (In Russ.)
6. Davydenko D.B., Hamburg K.Y. The deep structure of the junction zone of the Donetsk folded system and the Voronezh crystalline massif according to geophysical data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 28–38. DOI: 10.46698/VNC.2024.24.93.004. (In Russ.)
7. Oil of the USSR. Reference book in four volumes. Vol. II. Oil of the Middle and Lower Volga region. Eds. Z.V. Driackaya, M.A. Mhchiyan, N.M. Zhmyhova et al. Moscow. Himiya. 1972. 392 p. (In Russ.)
8. Oil of the USSR. Reference book in four volumes. Vol. III. Oil of the Caucasus and western regions of the European part of the USSR. Eds. G.G. Ashumov, E.S. Levchenko, A.S. Zhurba et al. Moscow. Himiya. 1972. 616 p. (In Russ.)
9. Oil and gas fields of the USSR. Reference book. Vol. I. The European part of the USSR. Ed. S.P. Maksimov. Moscow. Nedra. 1987. 258 p. (In Russ.)
10. Parada S.G. Geodynamic conditions of formation of ore-magmatic systems of Eastern Donbass according to petrochemical data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 122–132. DOI: 10.46698/VNC.2023.87.15.009. (In Russ.)
11. Portnaya E.L., Cejsler V.M., Chernova E.S. Stratigraphic columns of the cover of the Eastern European Platform. Textbook. Moscow. RSUGP. 1978. 68 p. (In Russ.)
12. Tectonics of the southern fringe of the East European Platform. Explanatory note to the tectonic map of the Black Sea-Caspian region. Scale 1:2 500 000. Krasnodar. KubSU. 2009. 213 p. (In Russ.)
13. Troschenko V.V. Cyclicity of coal accumulation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2017. No. 1. pp. 73–80. DOI: 10.23671/VNC.2017.1.9480. (In Russ.)
14. Yudin V.V. Geodynamics of Southern Donbass. Kiev. Ukr.GGRI. 2003. 92 p. (In Russ.)
15. Granovsky A.G. Magmatism and stages of the tectonic evolution in the Donetsk folded structure, Eastern Donetsk basin. *Geotectonics*. 2018. Vol. 52. No. 4. pp. 485–498. DOI: 10.1134/S0016852118040039.
16. Sachsenhofer R.F., Shymanovskyy V.A., Bechtel A., Gratzer R., Horsfield B., Reischenbacher D. Palaeozoic source rocks in the Dniepr-Donets Basin, Ukraine. *Petroleum Geoscience*. 2010. Vol. 16. pp. 377–399. DOI: 10.1144/1354-079309-032.
17. Saintot A., Stephenson R., Stovba S., Maystrenko Yu. Structures associated with inversion of the Donbas Foldbelt (Ukraine and Russia). *Tectonophysics*. 2003. Vol. 373. pp. 181–207. DOI: 10.1016/S0040-1951(03)00290-7.
18. Stovba S.M., Maystrenko Yu. P., Stephenson R.A., Kusznir N.J. The formation of the south-eastern part of the Dniepr-Donets Basin: 2-D forward and reverse modeling taking into account post-rift redeposition of syn-rift salt. *Sedimentary geology*. 2003. Vol. 156. Issue 1. pp. 11–33. DOI: 10.1016/S0037-0738(02)00280-4.
19. Stovba S., Khriashchevska O., Mazur S., Stephenson R., Vengrovych D., Drachev S. Hydrocarbon prospects in the Dniepr-Donets Basin, Ukraine, and the Ukrainian Carpathians: an overview. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*. 2024. Vol. 94. pp. 111–137. DOI: 10.14241/aspg.2024.07.
20. Stephenson R.A., Stovba S.M. The Dniepr-Donets Basin. *Regional Geology and Tectonics: Phanerozoic Rift Systems and Sedimentary Basins*. 2012 Vol. 1. pp. 421–441. DOI: 10.1016/B978-0-444-56356-9.00015-8.

УДК 504.062:911.6

DOI: 10.46698/VNC.2025.89.22.014

Оригинальная статья

Оценка рекреационной привлекательности Восточного Приазовья

О.Е. Архипова , С.А. Мисиров 

Южный научный центр Российской академии наук, Россия,
344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41,
e-mail: arhipova@ssc-ras.ru, sam.misirov@gmail.com

Статья поступила: 28.01.2025, доработана: 28.02.2025, принята к публикации: 03.03.2025

Резюме: Актуальность работы. Развитие рекреации и туризма Восточного Приазовья является одной из важнейших задач ряда региональных программ устойчивого развития до 2030–2040 гг. Важными задачами остаются сохранение имеющегося рекреационного потенциала, выявление ещё не использованных рекреационных возможностей берегов, учет современной динамики и процессов формирования берегов при современном развитии рекреационной деятельности. В складывающихся условиях актуально регулирование рекреационных нагрузок. Учитывая эти задачи, важно знать рекреационную ёмкость пляжных территорий, при которой не нарушается экологический баланс среды. **Цель исследования** – оценка возможностей развития прибрежной зоны Приазовья на основе данных о берегах, морфометрии и природной среде Азовского моря. **Источники данных** – информация о берегах, морфометрии клифов и природной среде Азовского моря, данные дистанционного зондирования, свободно распространяемые данные о территории «OpenStreetMap (OSM)» и исторические данные ДЗЗ «Google Планета Земля». **Методы.** В исследовании используются методы пространственного анализа в ГИС. Кроме того, в статье используется подход экспертных оценок и приводится сравнительный анализ методик оценки рекреационной ёмкости. **Результаты.** Результатом исследования является определение привлекательности объектов рекреации и оценка их транспортной доступности с использованием геоинформационных технологий. Была проведена оценка морфологической рекреационной привлекательности пляжей Азовского моря на основе интегрального показателя. Оценка отражает максимальную привлекательность для пляжного отдыха широких песчаных и минимальную небольших (узких), прислоненных к клифам пляжей. **Выводы.** Единые для всего макрорегиона природоохранные требования и экономические условия хозяйствования предполагают разработку единого особого подхода к принятию решений. Проведенное исследование является заделом, который можно будет использовать для расширения исследования на всю территорию Приазовья.

Ключевые слова: Восточное Приазовье, природно-рекреационный потенциал, дистанционное зондирование, геоинформационные технологии, морфометрические параметры, рекреационная ёмкость, рекреационная привлекательность, транспортная доступность.

Благодарности: Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. Проекта 125011200143-4 «Геоинформационные региональные модели и методы исследования систем «водосбор-водоем»».

Для цитирования: Архипова О.Е., Мисиров С.А. Оценка рекреационной привлекательности Восточного Приазовья. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2025.89.22.014

DOI: 10.46698/VNC.2025.89.22.014

Original paper

Assessment of the recreational attractiveness of the Eastern Azov region

O.E. Arkhipova^{id}, S.A. Misirov^{id}

Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Ave.,
Rostov-on-Don 344006, Russian Federation,
e-mail: arkhipova@ssc-ras.ru, sam.misirov@gmail.com

Received: 28.01.2025, revised: 28.02.2025, accepted: 03.03.2025

Abstract: Relevance. The development of recreation and tourism in the Eastern Azov region is one of the most important tasks of several regional sustainable development programs until 2030-2040. Important tasks include preserving the existing recreational potential, identifying unused recreational opportunities of the coasts, considering the current dynamics and processes of coast formation during the modern development of recreational activities. In the current conditions, regulation of recreational loads is relevant. Given these tasks, it is important to know the recreational capacity of the beach areas, which does not disturb the ecological balance of the environment. **The aim** of the study is to assess the possibilities for the development of the coastal zone of the Azov region based on data on the coasts, morphometry and natural environment of the Azov Sea. **Data sources** are information on the coasts, cliff morphometry and natural environment of the Azov Sea, remote sensing data, freely distributed data on the territory of "OpenStreetMap (OSM)" and historical remote sensing data of "Google Earth". **Methods.** The study uses spatial analysis methods in GIS. In addition, the article uses the approach of expert assessments and provides a comparative analysis of methods for assessing recreational capacity. **Results.** The result of the study is the determination of the attractiveness of recreational facilities and assessment of their transport accessibility using geoinformation technologies. An assessment of the morphological recreational attractiveness of the beaches of the Azov Sea was carried out based on an integral indicator. The assessment reflects the maximum attractiveness for beach recreation of wide sandy beaches and the minimum for small (narrow) beaches leaning against cliffs. **Conclusions.** Uniform environmental requirements and economic conditions for the entire macroregion suggest the development of a single special approach to decision-making. The conducted research is a reserve that can be used to expand the research to the entire territory of the Azov region.

Keywords: Eastern Azov region, natural and recreational potential, remote sensing, geoinformation technologies, morphometric parameters, recreational capacity, recreational attractiveness, transport accessibility.

Acknowledgments: The work was funded by the state assignment research of SSC RAS, project No. 125011200143-4 "Geoinformation regional models and methods for studying "catchment-reservoir" systems".

For citation: Arkhipova O.E., Misirov S.A. Assessment of the recreational attractiveness of the Eastern Azov region. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 166-179. DOI: 10.46698/VNC.2025.89.22.014

Введение

Несмотря на специфический и богатый природно-рекреационный потенциал, в настоящее время туристско-рекреационная сфера Азовского побережья занимает невысокое положение в системе Азово-Черноморского рекреационного комплекса России. Также, в работах [Архипова и др., 2011; Крыленко, Крыленко, 2013;

Ивлиева, Кушнир, 2017] отмечаются и другие проблемы, такие как низкий уровень развитости инфраструктуры и туристических услуг в сравнении с другими рекреационными районами. Ключевым фактором, сдерживающим в настоящее время развитие туризма в Приазовье, является сравнительно слабая и ухудшившаяся транспортная доступность региона. Для Приазовья в целом острой проблемой является сезонность туризма [Санин, 2024]. К природным лимитирующим факторам относят геолого-геоморфологическое строение побережья, а именно наличие высоких клифов (береговых обрывов), которые в процессе абразионной деятельности моря нередко обрушаются, что в свою очередь несет опасность для отдыхающих, и наличие в прибрежной акватории слоя соответствующих донных осадков.

В настоящее время изучение побережья Азовского моря имеет особую актуальность в связи с повышением рекреационного значения береговой зоны и возрастанием антропогенной нагрузки на неё. В то же время рекреационное районирование – имеет важное научное и прикладное значение для эффективного территориального планирования и управления развитием туристско-рекреационного комплекса региона (страны) [Забураева и др., 2024; Кушнир, 2023]. Развитие рекреации и туризма в регионе Азовского моря является одной из важнейших задач ряда региональных программ устойчивого развития до 2030–2040 гг.: Ростовской области (Стратегия социально-экономического развития Ростовской области на период до 2030 года: утверждена постановлением Правительства Ростовской области от 26.12.2018 № 864 в ред. от 19.12.2022 № 1100), Краснодарского края (О стратегии социально-экономического развития части территории Краснодарского края «Кубанское Приазовье» до 2030 года: утверждена Постановлением Губернатора Краснодарского края от 11.11.2024 № 752), Республики Крым и «Стратегии устойчивого развития Приазовья до 2040 года», которую представили президенту в мае 2024 года [Санин, 2024]. Согласно этой стратегии предполагается создание кластеров, приуроченных к крупнейшим прибрежным городам (Таганрог, Азов, Ейск, Приморско-Ахтарск, Славянск-на-Кубани, Темрюк), а также к естественным геоморфологическим аккумулятивным формам традиционно выступающим рекреационными кластерами косам: Беглицкой, Петрушинской, Павло-Очаковской, Чумбурской, Сазальникской, Глафиrowsкой, Ейской, Должанской, Камышеватской, Ясенской. Исходя из вышеизложенного, а также государственных планов по развитию региона Азовского моря, важными задачами остаются сохранение имеющегося рекреационного потенциала, выявление ещё неиспользованных рекреационных возможностей берегов, учёт современной динамики и процессов формирования берегов при современном развитии рекреационной деятельности. Однако следует учитывать, что туризм оказывает значительное воздействие на окружающую среду, особенно в морских охраняемых районах, которые, как заявлено, защищают биологические и экологические ценности [Corbau et al., 2019; Diniz et al., 2024].

Кроме того, когда речь идёт об устойчивости, необходимо также учитывать пределы роста и пропускную способность туристических направлений [Jurado et al., 2012]. Чрезмерная эксплуатация песчаных пляжей туристами снижает экологическую целостность, делая природные условия неудовлетворительными для нужд населения и приводя к негативным социально-экономическим последствиям. В этом контексте оценка туристической привлекательности направлена на поддержку

управления пляжами с социальной, экологической и экономической точек зрения [Nigussie et al., 2021]. Учитывая эти задачи, важно знать рекреационную ёмкость пляжных территорий, которая позволяет вычислить безопасное количество отдыхающих, при котором не нарушается экологический баланс среды. Понятие экологической ёмкости, как «величины допустимого, совокупного воздействия всех источников на окружающую среду в пределах туристской территории», включено в «Стратегию развития туризма в Российской Федерации на период до 2035 года» (Стратегия развития туризма в Российской Федерации на период до 2035 года: утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 сентября 2019 года № 2129-р.). Расчет экологической ёмкости – один из компонентов мастер-плана туристской территории, являющегося основанием для получения дополнительного финансирования [Плотникова, Васильева, 2019; Климанова и др., 2021; Адаева, Костовска, 2022; Макарова, Василевская, 2022].

Материал и методы

Информационной основой для оценки рекреационной ёмкости пляжей выступила разработанная в ЮНЦ РАН геоинформационная система «Берега Азовского моря», которая содержит информацию о берегах, морфометрии клифов, геологическом строении и данные полевых наблюдений.

Исследование проводилось в несколько этапов, на первом шаге выполнялась оцифровка пляжей и создание класса пространственных объектов для оценки рекреационной ёмкости. В качестве источников для картографирования использовался ряд данных дистанционного зондирования Земли из космоса (ДДЗЗ) с космических аппаратов (КА) «Ресурс-П» (<https://next.gptl.ru/>) в панхроматическом диапазоне, исторические данные ДЗЗ «Google Планета Земля», а также векторные классы пространственных объектов на основе свободно распространяемых данных о территории «OpenStreetMap (OSM)». В результате был получен полигональный класс векторных объектов, который включал информацию о площадях пляжей в каждом муниципальном образовании и линейный класс пространственных объектов, содержащий информацию о длине береговой линии исследуемых пляжей в каждом муниципальном образовании.

Расчет рекреационной ёмкости пляжей проводился по двум методикам:

1. Площадная – на основе норматива рекреационной ёмкости пляжа $5 \text{ м}^2/\text{чел.}$, согласно ГОСТ (ГОСТ Р 58737–2019 «Места отдыха на водных объектах». Общие положения: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2020–07–01). Такой норматив обеспечивает не только комфортность отдыха, но и позволяет сохранять гигиенические требования к морской воде.

2. Линейный норматив рекреационной ёмкости для песчаных пляжей – $3.5 \text{ м}/\text{чел.}$ Методика предложена Всесоюзным научным центром медицинской реабилитации и обобщена в работе [Карташова, Селиванова, 2013; Карташова и др., 2022].

Согласно этой методике в алгоритм расчета вводятся коэффициенты, определяемые экспертным путем:

– K_I – социально-экологический, его величина (0.8–0.5) зависит от степени негативного вмешательства человека в природные комплексы, от потока возможных воздействий, связанных с хозяйственной деятельностью;

– K_2 – рекреационной привлекательности, его величина (0.4–0.8) зависит от благоустройства территории, возможности в настоящее время использовать ее для отдыха, популярности места отдыха, стереотипа мышления отдыхающих.

На основе этих коэффициентов выводится норматив фактической рекреационной ёмкости на основе формулы (1) [Карташова, Селиванова, 2013; Карташова и др., 2022]:

$$l_n = 3.5 \times K_1 \times K_2 \quad (1)$$

Для коэффициента K_1 в качестве параметров использовались морфометрические данные пляжей полученные на основе поперечных профилей берега [Мисиров, 2023] (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Коэффициенты K_1 в зависимости от морфометрических параметров берега /
 K_1 coefficients depending on the morphometric parameters of the coast**

Ширина пляжа (м) / Beach width (m)	Коэффициент / Ratio
25	0.8
10–25	0.7
5–10	0.6
3–5	0.5
0–3	0

Для расчета рекреационной привлекательности в качестве основных индикаторов рассматривались рекреационная ёмкость пляжей, геоморфологические особенности пляжей (состав наносов, ширина пляжа, высота клифа) [Архипова и др., 2011; Орлова, 2010] (см. табл. 2). Такая методика оценки рекреационной привлекательности на основе интегрального подхода позволяет оценить влияние геоморфологических характеристик на рекреационную значимость берегов.

Информационной основой для оценки транспортной доступности рекреационных объектов выбраны данные векторных слоев OSM (OpenStreetMap) — слой автомобильных дорог, структурированный по типам покрытия, а также слой Железные дороги и Населенные пункты. Для решения задачи были использованы инструменты ArcGIS Pro (<https://pro.arcgis.com/>), которые используются для определения близости пространственных объектов в одном или нескольких классах пространственных объектов или между двумя классами объектов Метод Near (Ближайший объект) и Метод GenerateOriginDestinationLinks (связь Источник–Назначение). Эти инструменты позволяют определять пространственные объекты, ближайшие друг к другу, и вычислять расстояния между ними или вокруг них. Первый метод вычисляет минимальный интервал между рекреационными объектами и дорожной сетью, где два объекта расположены ближе всего друг к другу. Второй метод позволяет выделить кластеры рекреационных объектов, расположенных в зоне транспортной доступности. Для оценки развития автодорожной инфраструктуры используется индикатор транспортной инфраструктуры, учитывающий площадь муниципального образования, численность населения, протяженность дорог общего пользования местного назначения, отгрузку товаров собственного производства и выполнение работ и услуг собственными силами [Патракеева, 2020; Патракеева, Савельева, 2021].

Таблица 2 / Table 2

**Характеристика расчета показателя морфологической привлекательности
пляжей Азовского моря [Архипова и др., 2011] /**

**Characteristics of the calculation of the indicator of morphological attractiveness
of the beaches of the Azov Sea [Arkhipova et al., 2011]**

Характеристика пляжа / Beach characteristics		Привлекательность (баллы) / Attractiveness (points)				
		Привлекатель- ный (5 баллов) / Attractive (5 points)	Относительно привлекательный (4 балла) / Relatively attractive (4 points)	Нейтральный (3 балла) / Neutral (3 points)	Мало привлекатель- ный (2 балла) / Not very attractive (2 points)	Не привлекательный (1 балл) / Not attractive (1 point)
Геоморфологический фактор/ Geomorphological factor	Средняя ширина пляжа, м/ Average beach width, m	> 25	10–25	5–10	3–5	0
	Состав пляжевых наносов/ Composition of beach sediments	детритовые пески/ detritus sands	средне-крупно- зернистые пески/ medium to coarse grained sands	песчаные с включением галльки или гравия/ sandy with inclusion of pebbles or gravel	Галька/ pebbles	навалы глыб/ piles of boulders
	Высота клифа, м/ Cliff height, m	0	1–3	3–5	5–10	>10
	Слагающая порода клифов/ Cliff rock constituent	прочные, ко- ренные поро- ды, скалы/ solid, bedrock, rocks	породы средней прочности/ medium strength rocks	малопроч- ные/ medium strength rocks	непрочные/ not durable	рыхлые от- ложения/ loose sediments
	Средний уклон берегового склона, град. / Average slope of the shoreline, deg.	<= 10 (поло- гий) / (gently slop- ing)	15	30	70	90 (обры- вистый) / (precipiti- tous)

Результаты и обсуждение

Согласно приведенным выше методикам была рассчитана рекреационная ёмкость пляжей Восточного Приазовья (рис. 1). Результаты расчётов по обеим методикам представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 / Table 3

**Рекреационная ёмкость пляжей, рассчитанная на основе площадной методики /
Recreational capacity of beaches, calculated on the basis of the area methodology**

Муниципальный район / Municipal district	Субъект Федерации / Federal subject	Площадь пляжей общ. (м²)/ Total area of beaches (m²)	Норматив для песчаных пляжей (м²/чел.) ГОСТ Р 58737–2019 «Места отдыха на водных объектах» / Standard for sandy beaches (m²/person) GOST R 58737–2019 “Recreation areas on water bodies”	Рекреационная ёмкость (тыс. чел)/ Recreational capacity (thousand people)
Неклиновский / Neklinovsky	Ростовская область/ Rostov region	571920	5	114.385
Азовский / Azovsky	Ростовская область/ Rostov region	443814	5	88.763
Щербиновский / Shcherbinovsky	Краснодарский край / Krasnodar Krai	496802	5	99.361
Ейский / Yeysky	Краснодарский край / Krasnodar Krai	1683376	5	336.675
Приморско- Ахтарский / Primorsko- Akhtarsky	Краснодарский край / Krasnodar Krai	266176	5	53.235
Темрюкский/ Temryuksky	Краснодарский край / Krasnodar Krai	939580	5	187.916

Таблица 4 / Table 4

**Рекреационная ёмкость пляжей, рассчитанная на основе линейной методики /
Recreational capacity of beaches calculated using the linear method**

Муниципальный район / Municipal district	Субъект Федерации / Federal subject	Длина береговой линии пляжей (м)/ Length of beach coastline (m)	Рекреационная ёмкость пляжа (тыс. чел) / Recreational capacity (thousand people)
Неклиновский / Neklinovsky	Ростовская область / Rostov region	62079	65.7
Азовский / Azovsky	Ростовская область / Rostov region	33246	33.6
Щербиновский / Shcherbinovsky	Краснодарский край / Krasnodar Krai	19254	23.6
Ейский / Yeysky	Краснодарский край / Krasnodar Krai	59524	91.8
Приморско-Ахтарский / Primorsko-Akhtarsky	Краснодарский край / Krasnodar Krai	14467	18.1
Темрюкский / Temryuksky	Краснодарский край / Krasnodar Krai	61543	87.2

Исходя из сравнения методик, расчёт по линейному нормативу (формула 1) даёт намного меньшую ёмкость пляжа, так как учитывает только длину береговой ли-

нии, однако преимуществом является учет норматива фактической рекреационной ёмкости на основе весовых коэффициентов.

В результате, на основе всех полученных данных была проведена оценка морфологической рекреационной привлекательности пляжей Азовского моря в пределах Ростовской области и Краснодарского края на основе интегрального показателя (рис. 1). Оценка отражает максимальную привлекательность для пляжного отдыха широких песчаных и минимальную небольших (узких), прислоненных к клифам пляжей. Результаты расчёта выборочно по Ростовской области и Краснодарскому краю представлены в таблице 5.

Таблица 5 / Table 5

**Расчет показателя морфологической привлекательности пляжей
Азовского моря (на примере Азовского района Ростовской области
и Ейского района Краснодарского края /**

**Calculation of the morphological attractiveness index of the beaches of the Azov Sea
(using the Azov district of the Rostov region and the Yeisk district
of Krasnodar Krai as an example)**

Местоположение / Location	Рекреационная ёмкость / Recreational capacity		Факторы/ Factors							Сумма баллов / Total points
Муниципальное образование / Municipality	Рекреационная ёмкость пляжа (тыс. чел)/ Recreational capacity of the beach (thousand people)	Балл/ Point	Ширина пляжа (м)/ Beach width (m)	Балл/ Point	Состав наносов/ Sediment composition	Балл/ Point	Высота клифа (м)/ Cliff height (m)	Балл/ Point	Наличие оборудованных пляжей/ Availability of equipped beaches	
Круглянское сельское поселение / Kruglyanskoe rural settlement	6.3	1	3–5	2	Песок / Sand	5	10–15	1	Нет/no	9
Павло-Очаковская коса/ Pavlo-Ochakovskaya Spit	11.2	2	10–25	4	Песок / Sand	5	0	5	Да/yes	16
Чумбур-Коса/ Chumbur-Kosa	3.4	1	5–10	3	Песок / Sand	5	0	5	Нет/no	14
Семибалковское сельское поселение/ Semibalkovskoye rural settlement	5.7	1	3–5	2	Песок / Sand	5	10–20	1	Нет/no	9
Ейская коса/ Yeisk Spit	26.1	3	10–25	4	Песок / Sand	5	0	5	Да/yes	17
Должанское сельское поселение Dolzanskoye / rural settlement	0.0	0	0–3	0	Песок / Sand	5	10–11	1	Нет/no	6
коса Долгая/ Kosa Dolgaya	33.6	4	10–25	4	Песок/ Sand	5	0	5	Да/yes	18

Анализ показал, что наибольшей привлекательностью обладают аккумулятивные формы Азовского моря (косы), что подтверждается предыдущими исследова-

ниями и традиционным размещением курортов в этих областях (Ейская, Долгая, Обиточная косы) [Кушнир, 2023]. Эти формы имеют наибольшую рекреационную ёмкость, на территории большинства есть оборудованные пляжи, услуги для активного отдыха, а также предоставляются услуги по питанию и размещению гостей. На косах отсутствует ряд лимитирующих факторов, таких как наличие абразионного клифа, узких пляжей. Дополнительный фактор привлекательности – подводные продолжения этих кос, значительно превосходящие по площади и объёму собственно надводные косы. Точками роста рекреационной привлекательности могут стать косы Таганрогского залива (Бegliцкая, Чумбур-Коса, Сазальникская, Павло-Очаковская) при условии развития инфраструктуры, сервисов и услуг, которые есть в настоящее время на других аккумулятивных формах.

Кроме аккумулятивных форм, максимальной привлекательностью обладают пляжи Таманского полуострова. Этот регион традиционно притягивает туристов, так как имеет широкие песчаные пляжи, большое количество мест для размещения гостей, необходимую инфраструктуру и ряд специфических рекреационных ресурсов (бальнеологические, включающие в себя лечебные грязи вулканов, иловые грязи лиманов и озер, а также подземные минеральные источники, винодельческие хозяйства, памятники природы, а также богатое историко-археологическое и культурное наследие).

Следует отметить, что районы с наименьшей рекреационной привлекательностью с точки зрения наличия пляжей сосредоточены на территории Кубанских плавней. Этот регион традиционно привлекает туристов для рыбалки и охоты.

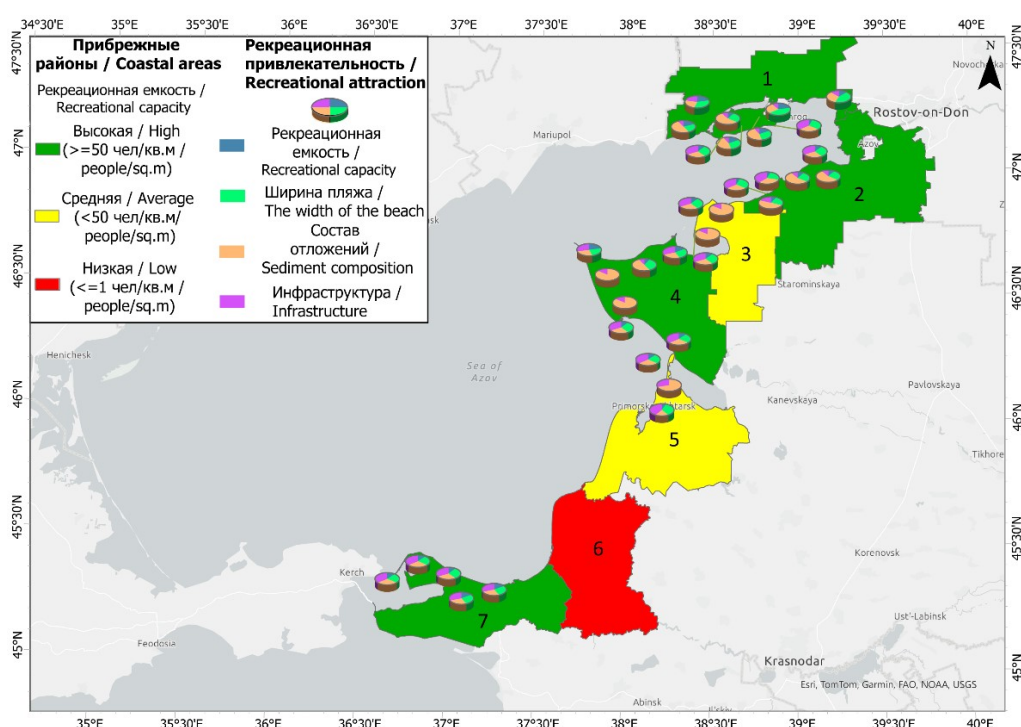


Рис. 1. Рекреационная привлекательность побережья Азовского моря на основе интегральной оценки/

Fig. 1. Recreational attractiveness of the Azov Sea coast based on an integrated assessment.

1. Неклиновский / Neklinovskij;
2. Азовский / Azovskij;
3. Щербиновский / Shherbinovskij;
4. Ейский / Ejskij;
5. Приморско-Ахтарский / Primorsko-Akhtarskij;
6. Славянский / Slavyanskij;
7. Темрюкский / Temryukskij

К территориям с наименьшей рекреационной привлекательностью по результатам анализа отнесены узкие полосы прислонённых к клифу (береговому обрыву) пляжей, имеющих небольшую ширину (от 1 до 7 м), и возвышающиеся над ними береговые абразионные или оползневые обрывы. Такие пляжи распространены на побережье Таганрогского залива (Платовское, Семибалковское, Глафиrowsкое, Щабельское сельские поселения), а также на территории Краснодарского края (Должанское, Камышеватское, Бородинское сельские поселения, район г. Приморско-Ахтарска).

При помощи метода Near (Ближайший объект) была оценена транспортная доступность рекреационных объектов побережья. На основе полученных данных сделан вывод, что наиболее доступными являются объекты, расположенные вдоль Таганрогского залива (Неклиновский, Азовский, Щербиновский, Ейский районы), Таманского полуострова (Темрюкский район), образуя рекреационные кластеры, что подтверждает и второй метод оценки связей GenerateOriginDestinationLinks (связь Источник–Назначение) (рис. 2). Однако следует отметить, что побережье Приморско-Ахтарского и Славянского районов в основном занято водно-болотными угодьями и плавнями, что представляет интерес для таких видов отдыха как охота и рыболовство (рис. 2).

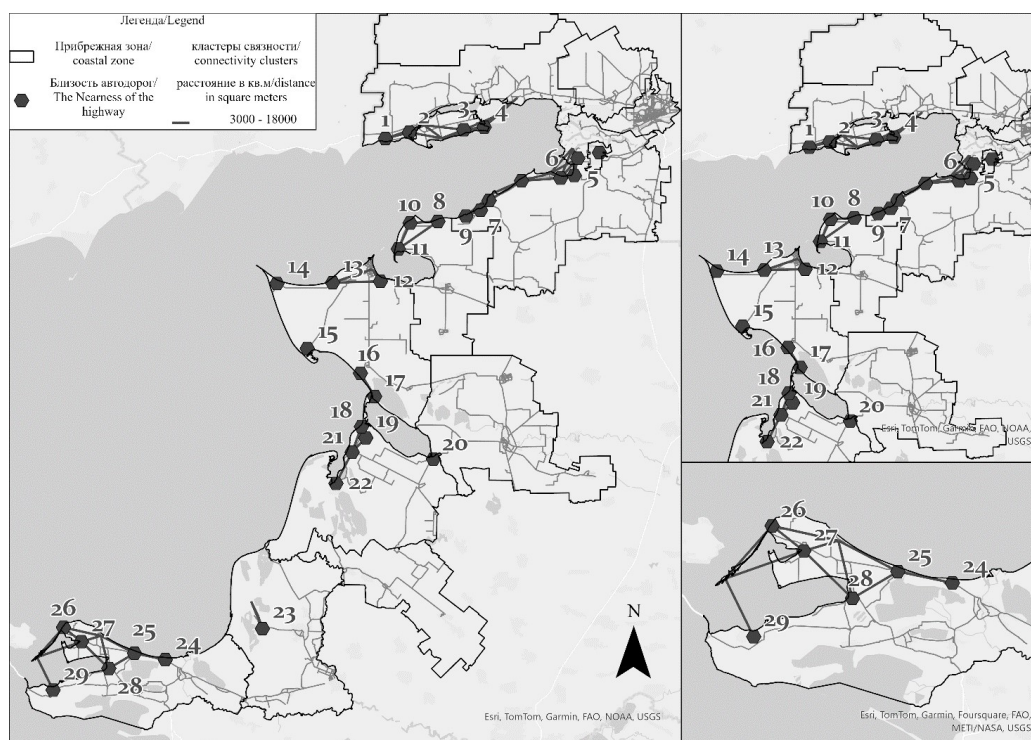


Рис. 2. Транспортная доступность рекреационных объектов и кластеры связности /
Fig. 2. Transport accessibility of recreational facilities and connectivity clusters.

1. Весело-Вознесенка / Veselo-Voznesenka; 2. Натальевка / Natalyevka; 3. Веселый/Vesely;
4. Новобессергеновка / Novobessergenevka; 5. Займо-обрыв / Zaimo-obryv; 6. Круглое / Krugloe;
7. Новомаргаритово / Novomargaritovo; 8. Молчановка / Molchanovka; 9. Порт Катон / Port Katon;
10. Щабельское / Shabelskoye; 11. Глафировка / Glafirovka; 12. Широчанка / Shirochanka;
13. Воронцовка / Vorontsovka; 14. Должанская / Dolzhanskaya; 15. Камышеватская /
Kamyshhevatskaya; 16. Шиловка / Shilovka; 17. Ясенская переправа / Yasenskaya ferry;
18. Морозовский / Morozovsky;
19. Бородинская / Borodinskaya; 20. Бриньковская / Brinkovskaya; 21. Приморско-Ахтарск /
Primorsko-Akhtarsk; 22. Садки / Sadki; 23. Черноерковская / Chernoerkovskaya; 24. Голубицкая /
Golubitskaya; 25. Пересыпь / Peresyp; 26. Ильич / Ilyich; 27. Запорожская / Zaporozhskaya;
28. Сенной / Sennoy; 29. Тамань / Taman

Согласно методике, изложенной в [Патракеева, 2020; Патракеева, Савельева, 2021], был рассчитан индекс транспортной инфраструктуры на основе данных из открытых источников за период с 2015 по 2021 годы. Согласно региональному проекту «Дорожная сеть», который реализуется в рамках национального проекта «Безопасные качественные дороги», доля автомобильных дорог в Ростовской области регионального и муниципального значения, соответствующих нормативным требованиям, должна составлять 56,1%. Однако прибрежные территории характеризуются низким качеством дорожного покрытия, за исключением Азова. По Краснодарскому краю целевой уровень соответствия нормативам – 54%. Расчёты за период 2015–2021 гг. показали, что наибольший прирост индекса зафиксирован в Приморско-Ахтарском, Неклиновском и Азовском районах, что обеспечено значительным увеличением протяженности дорожной сети при незначительном росте, как численности населения, так и экономической активности.

Заключение

В настоящее время изучение побережья Азовского моря имеет особую актуальность в связи с повышением рекреационного значения береговой зоны и возрастанием антропогенной нагрузки на неё. Основными проблемами в настоящее время являются отсутствие рекреационной инфраструктуры, необходимость улучшения дорог, а также геолого-геоморфологическое строение побережья. Сейчас результатом понимания серьезности проблемы стала идея создания единой программы развития Приазовья. Развитие рекреации и туризма в регионе Азовского моря является одной из важнейших задач ряда региональных программ устойчивого развития до 2030–2040 гг. (Ростовской области, Краснодарского края, Республики Крым) и Стратегии устойчивого развития Приазовья до 2040 года. Каждый регион уже предпринимает определенные шаги по решению экологических проблем моря, развитию туризма, наращиванию инфраструктуры, развитию экономики с учетом экологических особенностей Приазовья. Единые для всего макрорегиона природоохранные требования и экономические условия хозяйствования предполагают разработку единого особого подхода к принятию решений. Проведенное исследование является заделом, который можно будет использовать для оценки рекреационной привлекательности всей территории Приазовья.

Литература

1. Адаева Д.О., Костовска С.К. Методические подходы к оценке экологической ёмкости территории прибрежного геопарка в Юго-Восточном Крыму. // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2022. – Т. 8. Вып. 4. – С. 83–93.
2. Архипова О.Е., Беспалова Л.А., Ивлиева О.В. Влияние геоморфологических характеристик на рекреационную значимость берегов. Оценка рекреационного потенциала. // Экология. Экономика. Информатика. Материалы XXXIX Международной конференции «Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования». Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ, 2011. – С. 395–399.
3. Забураева Х.Ш., Забураев Ч.Ш., Седиева М.Б. Рекреационное районирование Северо-Восточного Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 3. – С. 148–162. DOI: 10.46698/z6459-3055-9234-e.
4. Ивлиева О.В., Кушнир К.В. Современное состояние средств размещения туристов на российском побережье Азовского моря. // Географический вестник. – 2017. – №3(42). – С. 116–125. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-3-116-125.

5. Карташова Н.П., Селиванова А.С. Рекреационная ёмкость пляжных территорий и их благоустройство (на примере береговой линии реки Воронеж). // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. №3(2). – С. 638–642.
6. Карташова Н.П., Сериков М.Т., Кулакова Е.Н., Астрелина Ю.Г. Концепция создания рекреационных зон на прибрежных территориях. // Лесотехнический журнал. – 2020. – Т. 10. № 2. – С. 151–160. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.2/15.
7. Климанова О.А., Колбовский Е.Ю., Илларионова О.А., Землянский Д.Ю. Концепция экологической ёмкости: современное содержание и алгоритм оценки для разных типов туристских территорий. // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. – № 66(4). – С. 806–830. DOI: 10.21638/spbu07.2021.409.
8. Крыленко М.В., Крыленко В.В. Научное обеспечение сбалансированного планирования хозяйственной деятельности на уникальных морских береговых ландшафтах и предложения по его использованию на примере Азово-Черноморского побережья. 2013. Том 7: Азовское море. 1189 с.
9. Кушнир К.В. Опорный туристско-рекреационный каркас Российского Приазовья и перспективы его развития. // Современные проблемы сервиса и туризма. – 2023. – Т. 17. № 2. – С. 110–119.
10. Макарова В.Н., Василевская Е.А. Нормирование потока туристов при проектировании экологических троп с целью сохранения природных ресурсов на особо охраняемых природных территориях. // Отходы и ресурсы. – 2022. – Т. 9. № 3. – 9 с. DOI: 10.15862/09NZOR3229.
11. Мисиров С.А. Современные морфометрические данные береговой зоны Таганрогского залива в пределах Ростовской области (по материалам экспедиционных исследований ЮНЦ РАН). // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. – 2023. – Т. 2. № 8. – С. 56–62. DOI: 10.23885/2500-123X-2023-2-8-56-62.
12. Орлова М.С. Геоморфологическая оценка рекреационного потенциала морских берегов северо-западного Крыма. // Геоморфология. – 2010. – Вып. 2. – С. 91–102.
13. Патракеева О.Ю., Савельева О.С. Современное состояние и приоритеты развития транспортной инфраструктуры Ростовской области. // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2021. – Т. 17. Вып. 9. – С. 1713–1736.
14. Патракеева О.Ю. Перспективы социально-экономического развития Краснодарского края в контексте реализации национальных проектов в сфере транспортной инфраструктуры. // Региональная экономика. Юг России. – 2020. – Т. 8. № 2. – С. 122–130. DOI: 10.15688/re.volsu.2020.2.12.
15. Плотникова В.С., Васильева А.В. Рекреационная ёмкость как организационно-экономический инструмент развития экологического туризма на особо охраняемой природной территории // Экономические отношения. – 2019. – Т. 9. № 3. – С. 2191–2202.
16. Санин А.Ю. Проблемы и перспективы туризма в Приазовье в новых политических реалиях. // Материалы V Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова «Стратегические проблемы, угрозы и риски Азовского бассейна и Приазовья. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, – 2024. – С. 390–395.
17. Corbau C., Benedetto G., Congiatu P.P., Simeoni U., Carboni D. Tourism analysis at Asinara Island (Italy): Carrying capacity and web evaluations in two pocket beaches. // Ocean & Coastal Management. – 2019. – Vol. 169. – pp. 27–36. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2018.12.004.
18. Diniz L.L., Machado Ph.M., Baudson do Nascimento A., Costa L.L., David da Costa I. et al. Evaluation of tourist carrying capacity to support recreational beaches management. // Ocean & Coastal Management. – 2024. – Vol. 249. Art. No. 107022. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2024.107022.
19. Jurado E.N., Tejada M. T., Garcia F. A., González J.C., Macias R.C., Delgado J.P. et al. Carrying capacity assessment for tourist destinations. Methodology for the creation of synthetic

indicators applied in a coastal area. // *Tourism Management*. – 2012. – Vol. 33. – pp. 1337–1346. DOI: 10.1016/j.tourman.2011.12.017.

20. Nigussie S., Liu L., Yeshitela K. Indicator development for assessing recreational ecosystem service capacity of urban green spaces– A participatory approach. // *Ecological Indicators*. – 2021. – Vol. 121. Art. No. 107026. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107026.

References

1. Adaeva D.O., Kostovska S.K. Methodological approaches to assessing the ecological capacity of the coastal geopark territory in South-Eastern Crimea. *Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions*. 2022. Vol. 8. Issue 4. pp. 83–93. (In Russ.)

2. Arkhipova O.E., Beshpalova L.A., Ivlieva O.V. Influence of geomorphological characteristics on the recreational significance of the coast. Assessment of recreational potential. *Ecology. Economy. Informatics*. In: XXXIX International Conference “Mathematical Modeling in Problems of Rational Nature Management”. Rostov-on-Don. SFEDU. 2011. pp. 395–399. (In Russ.)

3. Zaburaeva Kh.Sh., Zaburaev Ch.Sh., Sedieva M.B. Recreational zoning of the North-East Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 148–162. DOI: 10.46698/z6459-3055-9234-e. (In Russ.)

4. Ivlieva O.V., Kushnir K.V. Current state of tourist accommodation facilities on the Russian coast of the Sea of Azov. *Geographical Bulletin*. 2017. No. 3. Issue 42. pp. 116–125. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-3-116-125. (In Russ.)

5. Kartashova N.P., Selivanova A.S. Recreational capacity of beach areas and their improvement (on the example of the Voronezh River coastline). *Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013. Vol. 15. No. 3(2). pp. 638–642. (In Russ.)

6. Kartashova N.P., Serikov M.T., Kulakova E.N., Astrelina Yu.G. The concept of creating recreational zones in coastal areas. *Forestry journal*. 2020. Vol. 10. No. 2. pp. 151–160. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.2/15. (In Russ.)

7. Klimanova O.A., Kolbovsky E.Yu., Illarionova O.A., Zemlyansky D.Yu. The concept of ecological capacity: modern content and assessment algorithm for different types of tourist areas. *Bulletin of St. Petersburg State University. Earth Sciences*. 2021. No. 66. Issue 4. pp. 806–830. DOI: 10.21638/spbu07.2021.409. (In Russ.)

8. Krylenko M.V., Krylenko V. V. Scientific support for balanced planning of economic activities on unique marine coastal landscapes and proposals for its use on the example of the Azov-Black Sea coast. 2013. Vol. 7, Sea of Azov. 1189 p. (In Russ.)

9. Kushnir K.V. The supporting tourist and recreational framework of the Russian Azov region and the prospects for its development. *Modern Problems of Service and Tourism*. 2023. Vol. 17. No. 2. pp. 110–119. (In Russ.)

10. Makarova V.N., Vasilevskaya E.A. Standardization of tourist flow when designing ecological trails to preserve natural resources in specially protected natural areas. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2022. Vol. 9. No. 3. DOI: 10.15862/09NZOR3229. (In Russ.)

11. Misirov S. A. Modern morphometric data of the coastal zone of the Taganrog Bay within the Rostov region (based on the materials of expeditionary research of SSC RAS). *Ecology. Economy. Informatics. Series: Geoinformation Technologies and Space Monitoring*. 2023. Vol. 2. No. 8. pp. 56–62. DOI: 10.23885/2500-123X-2023-2-8-56-62. (In Russ.)

12. Orlova M.S. Geomorphological assessment of the recreational potential of the seacoasts of the northwestern Crimea. *Geomorphology*. 2010. Issue 2. pp. 91–102. (In Russ.)

13. Patrakeeva O.Yu., Savelyeva O.S. Current state and priorities for the development of transport infrastructure in the Rostov region. *National Interests: Priorities and Security*. 2021. Vol. 17. Issue 9. pp. 1713–1736. (In Russ.)

14. Patrakeeva O. Yu. Prospects for the socio-economic development of the Krasnodar Territory in the context of the implementation of national projects in the field of transport

infrastructure. *Regional Economy. South of Russia*. 2020 Vol. 8. No. 2. pp. 122–130. DOI: 10.15688/re.volsu.2020.2.12. (In Russ.)

15. Plotnikova V.S., Vasilyeva A.V. Recreational capacity as an organizational and economic tool for the development of ecological tourism in a specially protected natural area. *Economic Relations*. 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 2191–2202. (In Russ.)

16. Sanin A.Yu. Problems and prospects of tourism in the Azov Region in the new political realities. In: *Proceedings of the V International Scientific Conference in Memory of Corresponding Member of RAS D.G. Matishov “Strategic problems, threats and risks of the Azov Basin and the Azov Region”*. Rostov-on-Don. SSC RAS. 2024. pp. 390–395. (In Russ.)

17. Corbau C., Benedetto G., Congiatu P.P., Simeoni U., Carboni D. Tourism analysis at Asinara Island (Italy): Carrying capacity and web evaluations in two pocket beaches. *Ocean & Coastal Management*. 2019. Vol. 169. pp. 27–36. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2018.12.004.

18. Diniz L.L., Machado Ph.M., Baudson do Nascimento A., Costa L.L., David da Costa I. et al. Evaluation of tourist carrying capacity to support recreational beaches management. *Ocean & Coastal Management*. 2024. Vol. 249. Art. No. 107022. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2024.107022.

19. Jurado E.N., Tejada M. T., Garcia F. A., González J.C., Macias R.C., Delgado J.P. et al. Carrying capacity assessment for tourist destinations. Methodology for the creation of synthetic indicators applied in a coastal area. *Tourism Management*. 2012. Vol. 33. pp. 1337–1346. DOI: 10.1016/j.tourman.2011.12.017.

20. Nigussie S., Liu L., Yeshitela K. Indicator development for assessing recreational ecosystem service capacity of urban green spaces— A participatory approach. *Ecological Indicators*. 2021. Vol. 121. Art. No. 107026. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107026.

УДК 379.85;502.3

DOI: 10.46698/VNC.2025.26.88.015

Оригинальная статья

Горные регионы России как центры развития экологического туризма

Х.Ш. Забураева¹, А.А. Шаипова^{1, 2}

¹ Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Россия, 364020, г. Грозный, ул. В. Алиева, 21а, e-mail: eveggne@mail.ru;

² Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, 100

Статья поступила: 28.11.2024, доработана: 03.02.2025, принята к публикации: 07.02.2025

Резюме: Актуальность работы определяется возрастающей ролью туристско-рекреационной отрасли в решении проблем отсталости по уровню социально-экономического развития, присущих горным районам России и мира. **Цель работы** – оценить различия в потенциале горных регионов России для организации экотуризма. **Методы работы:** анализ и синтез, обобщение, статистический, сравнительно-географический, системный и исторический. **Результаты работы.** Доказано, что в условиях уязвимости горных экосистем, с целью предотвращения их деградации, сохранения биологического разнообразия, альтернативой массовому туризму должен стать экологический туризм. Экотуризм представляет собой все виды природоориентированных направлений туризма, призванных обеспечить социальное благополучие, экономический рост регионов и сохранение природных систем. Показано, что на территориях более половины субъектов Российской Федерации имеются горные образования. В горных регионах выявлен значительный потенциал для развития разнообразных видов экотуризма: высокое ландшафтное, биологическое и этногенетическое разнообразие, наличие объектов природного и историко-культурного наследия и особо охраняемых природных территорий. На основе проведенных исследований определены следующие перспективные направления экотуризма в горных регионах России: геологический туризм (Северная Осетия-Алания, Ингушетия, Чечня, Дагестан и др.), спелеотуризм (Алтайский, Красноярский, Хабаровский края, Челябинская область и др.), агротуризм (Алтай, Дагестан, Ингушетия, Чечня, Кабардино-Балкария и др.), островной туризм (Приморский и Хабаровский края и др.), туры на вулканы (Камчатский край) и др. Показано, что потенциал экотуризма используется в незначительной степени. Сделаны выводы, что для развития экотуризма в исследуемых регионах необходимы значительные инвестиции в туристско-рекреационную сферу, транспортную инфраструктуру труднодоступных горных районов, подготовка квалифицированных кадров, вовлечение в сферу рекреации и туризма местного населения. Решение обозначенных проблем в комплексе с научно-обоснованными подходами к рациональному использованию туристско-рекреационных ресурсов в перспективе позволит развивать здесь внутренний и международный экологический туризм.

Ключевые слова: горные регионы, экологический туризм, потенциал, рекреационные ресурсы, горные экосистемы, устойчивое развитие.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-17-00218 «Экологический туризм и рекреационное природопользование на Северо-Восточном Кавказе»).

Для цитирования: Забураева Х.Ш., Шаипова А.А. Горные регионы России как центры развития экологического туризма. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 180-193. DOI: 10.46698/VNC.2025.26.88.015

DOI: 10.46698/VNC.2025.26.88.015

Original paper

Mountain regions of Russia as centers for the development of ecological tourism

Kh.Sh. Zaburaeva¹, A.A. Shaipova^{1, 2}

¹ Kh.I. Ibragimov Complex Institute, Russian Academy of Sciences,
21a V. Alieva Str., Grozny 364020, Russian Federation,
e-mail: eveggne@mail.ru;

² Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov,
100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 364051, Russian Federation

Received: 28.11.2024, revised: 03.02.2025, accepted: 07.02.2025

Abstract: The relevance of the paper is determined by the increasing role of tourism and recreation industry to solve the problems of backwardness in terms of socio-economic development, characteristic of mountainous regions of Russia and the world. **The aim** of the work is to assess the differences in the potential of mountain regions of Russia for organizing ecotourism. **Research methods:** analysis and synthesis, generalization, statistical, comparative-geographical, systematic and historical. **Results.** It has been proven that in conditions of vulnerability of mountain ecosystems, in order to prevent their degradation, preserve biological diversity, ecological tourism should become an alternative to mass tourism. Ecotourism represents all types of nature-oriented tourism areas designed to ensure social well-being, economic growth of the regions and the preservation of natural systems. It has been shown that in the territories of more than half of the constituent entities of the Russian Federation there are mining formations. In the mountainous regions, significant potential has been identified for the development of various types of ecotourism: high landscape, biological and ethnogenetic diversity, the presence of objects of natural and historical and cultural heritage and specially protected natural areas. The following promising areas of ecotourism have been proposed in the mountainous regions of Russia: geological tourism (North Ossetia-Alania, Ingushetia, Chechnya, Dagestan, etc.), speleotourism (Altai, Krasnoyarsk, Khabarovsk Territories, Chelyabinsk Region, etc.), agritourism (Altai, Dagestan, Ingushetia, Chechnya, Kabardino-Balkaria, etc.), island tourism (Primorsky and Khabarovsk Territories, etc.), tours to volcanoes (Kamchatka Territory), etc. The potential of ecotourism has been shown to be marginally exploited. It was concluded that for the development of ecotourism in the regions under study, large investments are required in the tourist and recreational complex, the transport infrastructure of hard-to-reach mountainous areas, to train qualified specialists and attract the indigenous population to the recreation and tourism sector. Solving the indicated problems in combination with scientifically based approaches to the rational use of tourist and recreational resources in the future will allow developing domestic and international ecological tourism here.

Keywords: mountain regions, ecological tourism, potential, recreational resources, mountain ecosystems, sustainable development.

Acknowledgment: The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 23-17-00218 "Ecological tourism and recreational nature management in the North-East Caucasus").

For citation: Zaburaeva Kh.Sh., Shaipova A.A. Mountain regions of Russia as centers for the development of ecological tourism. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 180-193. DOI: 10.46698/VNC.2025.26.88.015

Введение в горную проблематику

Россия – горная страна (по классификации ЮНЕП). Горы, плоскогорья и плато занимают свыше половины ее территории [Дабиев, 2022]. Географическая закономерность заключается в том, что горы распространены по территории страны не-

равномерно. Наибольшие площади горной местности (около 90%) приходятся на азиатскую часть России, включая Средне-Сибирское плоскогорье, Алтай-Саянскую горную страну и Байкальский регион [Котляков, Баденков, 2010]. В европейской части горы занимают меньше площади, чем на Дальнем Востоке и в Сибири.

Горные образования имеются во многих субъектах страны (табл. 1). Большинство объектов природного и культурного наследия ЮНЕСКО в Российской Федерации территориально расположены в Крыму, на Кавказе, Урале, Алтае, Камчатке и др.

Таблица 1 / Table 1

**Группировка регионов России по площади, занимаемой горами /
Grouping of Russian regions by mountain area**

№ п/п	Регионы / Regions	Степень гористости, % / Degree of mountainousness, %
1	Карелия, Коми, Крым; Алтайский, Ставропольский края; Архангельская и Оренбургская области; Еврейская, Ханты-Мансийский, Ямало-Ненецкий автономные области и округа / Karelia, Komi, Crimea; Altai, Stavropol Territory; Arkhangelsk and Orenburg regions; Jewish, Khanty-Mansiysk, Yamalo-Nenets Autonomous Oblasts and Districts	менее 25 / lower than 25
2	Адыгея, Дагестан, Ингушетия, Чечня; Краснодарский, Пермский края; Свердловская область; Таймырский автономный округ / Adygeya, Dagestan, Ingushetia, Chechnya; Krasnodar, Perm territories; Sverdlovsk Oblast; Taimyr Autonomous Okrug	25-50
3	Башкортостан, Кабардино-Балкария, Саха (Якутия); Красноярский край; Амурская, Мурманская, Сахалинская, Челябинская области; Агинский и Усть-Ордынский автономные округа / Bashkortostan, Kabardino-Balkaria, Sakha (Yakutia); Krasnoyarsk Krai; Amur, Murmansk, Sakhalin and Chelyabinsk regions; Aginsky and Ust-Ordynsky Autonomous Districts	50-75
4	Алтай, Бурятия, Тыва, Хакасия, Карачаево-Черкесия, Северная Осетия-Алания; Приморский и Хабаровский края; Иркутская, Камчатская, Кемеровская, Магаданская и Читинская области; Корякский, Чукотский и Эвенкийский автономные округа / Altai, Buryatia, Tyva, Khakassia, Karachay-Cherkessia, North Ossetia-Alania; Primorsky and Khabarovsk Krai; Irkutsk, Kamchatka, Kemerovo, Magadan and Chita Oblasts; Koryak, Chukotka and Evenk Autonomous Okrugs	свыше 75 / over 75

Источник: составлено по (Дабиев, 2022; Котляков, Баденков, 2010) / *Source:* compiled from (Dabiev, 2022; Kotlyakov, Badenkov, 2010)

Значение гор для человечества трудно переоценить. Они выполняют важные функции в формировании климата, являются источником ценнейших ресурсов, энергии, воды. По различным оценкам в горных районах проживает до 15% мирового населения [Дабиев, 2022]. В процессе длительного эволюционного развития в горных геосистемах сохранилось богатое биологическое и минеральное разнообразие. Как отмечают некоторые зарубежные исследователи [Perrigo et al., 2020] геологические и биологические процессы в горах взаимосвязаны и взаимоувязаны, создавая прочную основу для биоразнообразия. В горных регионах сосредоточены

центры эндемизма флоры и фауны. С ними исторически связаны процессы формирования и развития многих самобытных этносов с уникальными культурами. По данным Всемирной туристской организации на долю горного туризма приходится около 20% мирового туризма.

В работе [Zeng et al., 2022] показано, что за период 2010-2020 гг. резко возросло количество публикаций, посвященных исследованию горного туризма и проиндексированных в Web of Science. Лидирующими по объему исследований оказались страны со значительными горными территориями (США, Китай, Канада, Австралия, Румыния, Япония и др.).

Горный туризм играет ключевую роль в социально-экономическом развитии России. Особую актуальность он обретает в регионах, где встречается большое разнообразие исторических этнокультурных комплексов. Наиболее высокое ландшафтное разнообразие отмечают на Северном Кавказе (Северная Осетия-Алания, Кабардино-Балкария, Чечня, Ингушетия) и меньшее в Тыве, Алтае, Бурятии, Амурской и Камчатской областях и др. [Мельченко и др., 2004]. Данные выводы базируются на сравнительном анализе регионов России по числу видов ландшафтов к общей площади территории субъекта.

Цель работы – оценить различия в потенциале горных регионов России для организации экотуризма.

Материалы и методология исследования

Фактологическую базу исследования составили материалы Федеральной службы государственной статистики; региональных министерств природных ресурсов и экологии; культуры и туризма; труды отечественных и зарубежных ученых, посвященные специфике развития экотуризма. Использовались методы анализа и синтеза, статистический, сравнительно-географический, системный и исторический.

Основной материал, представленный в данной работе, получен авторами в ходе экспедиционных выездов в 2024 г. в ряд горных районов Дагестана и Чечни в рамках реализации грантового соглашения с Российским научным фондом.

Результаты и обсуждение

Сущность концепции экологического туризма

Экологический туризм – одно из наиболее активно развивающихся за последние десятилетия направлений индустрии туризма. История зарождения концепции экотуризма уходит своими корнями в конец XX в. и связывают ее с осознанием геоэкологических проблем [Huseynzade, 2023]. Основными регионами, генерирующими спрос на экотуризм, стали страны Западной Европы и Северной Америки, где природоохранная система развита наиболее полно [Baloch et al., 2023]. Некоторые исследователи появление концепции экотуризма связывают с усиливающимся прессингом на природные и культурно-исторические рекреационные ресурсы вследствие роста туристических потоков [Fadafan et al., 2022]. Ожидалось, что альтернативный туризм будет способствовать экономическому росту стран, социальному благополучию и позволит сохранить природную среду.

Современные исследования, посвященные проблемам экотуризма, в значительной степени дифференцированы по целям, философским взглядам и теоретико-методологическим подходам [Baloch и др., 2023; Fadafan et al., 2022; Huseynzade, 2023]. В отечественной литературе в качестве синонимов понятия «экотуризм» ис-

пользуется порядка двух десятков терминов: от научного, природоохранного, сельского, зеленого, альтернативного до социально-ответственного и устойчивого [Волков, Ковалев, 2020; Косарева, 2020 и др.]. В зарубежных публикациях встречаются термины «Ecological tourism», «Ecotourism», «Green tourism» [Cervený, 2022; Jones, 2022 и др.].

Все существующие подходы к определению экотуризма можно свести к двум формам: узкой (классической) и широкой. Первая форма предполагает экологические туры непосредственно в границах особо охраняемых природных территорий и акваторий (ООПТ). В широком смысле значение экотуризма близко к западноевропейскому аналогу и может подразумевать все виды экологически ориентированного туризма как в границах ООПТ, так и за их пределами. В данной работе экотуризм интерпретируется в широком смысле.

У современных исследователей [Fadafan et al., 2022] экотуризм ассоциируется с деятельностью, направленной на охрану и снижение негативного воздействия на окружающую среду, стимулирование экономического развития и улучшение качества жизни и деятельности местного населения. В этом контексте экотуризм выступает в качестве инструментария устойчивого развития региона. Большинство исследователей в качестве важнейшего условия развития экотуризма отмечают необходимость большей экологической осведомленности туристов и стимулирования их экологически ответственного поведения [Cervený, 2022].

Особенности горного экотуризма

Горные экосистемы отличаются высоким биоразнообразием. Этим объясняется создание биосферных заповедников и иных категорий ООПТ в горных районах (регионах). В горных районах сосредоточено уникальное культурное наследие. Здесь компактно проживают различные этнические группы, сохранившие собственный язык, традиции и культуру. При этом они весьма уязвимы и часто подвергаются таким антропогенным факторам как нерациональное использование биологических ресурсов, ненормированный выпас скота, вооруженные конфликты и др. [Huseynzade, 2023].

Многие горные сообщества по всему миру поддерживают концепцию экотуризма в надежде решить геоэкологические проблемы и стимулировать экономическое развитие горных районов [Nepal, 2002]. Хотя отсутствует единство в понимании структуры и содержания экотуризма, предполагается, что горный экотуризм будет способствовать ответственному поведению туристов, сохранению горных экосистем, в частности, уникальных объектов животного и растительного мира, нетронутых эталонных участков. Горный экотуризм сопряжен с геоэкологическими рисками, что требует пристального внимания к вопросам стратегического планирования управления, контроля и регулирования данного вида туризма [Заалишвили и др., 2024].

Современные исследователи горный экотуризм расценивают как ключ к решению двойной проблемы сельских горных районов: сокращение бедности и сведение к минимуму деградации горных экосистем [Jones, 2022]. Важная роль отводится местным сообществам, включая реализацию туристического продукта, решение геоэкологических проблем и др. Зарубежный опыт свидетельствует о высокой эффективности интегрирования коренных этносов в экотуризм [Zeng et al., 2022].

Как утверждает S.K. Nepal (2002) горный экотуризм должен характеризоваться

научно-обоснованным планированием, эффективностью, экологичностью, аутентичностью и сбалансированным развитием. В планировании развития горных территорий важная роль отводится функциональному зонированию, которое позволяет выделять потенциальные территории интенсивного туристско-рекреационного использования и природоохранного назначения.

Экологический туризм в горных регионах России

С учетом мировых трендов в концепции развития экологического туризма в горных регионах России с успехом могут развиваться обе модели экотуризма (американская и западноевропейская). Экологический туризм в России регулируется нормативно-правовыми актами федерального, регионального и муниципального уровня. В исследовании [Шабалина и др., 2021] к сдерживающим факторам развития экотуризма в России отнесены незакрепленность в законодательстве понятия экотуризм, отсутствие четко проработанной, налаженной системы получения разрешительной проектной документации, что создает препятствия для доступа предпринимателей к ООПТ и объектам. В числе других факторов: недостаточный приток инвестиций, износ туристско-рекреационной инфраструктуры, дефицит высококвалифицированных кадров и др. В ряде регионов, к примеру, на Алтае и во всем Алтае-Саянском регионе уже намечаются первые шаги по разработке программ развития экотуризма [Кундиус, Миронова, 2022]. Однако в настоящее время в структуре российского отраслевого рынка доля экотуризма все еще незначительна (1,5%) [Воликов, Ковалев, 2020].

В исследуемых регионах имеется значительный потенциал для развития различных разновидностей экотуризма: агротуризм, спелеотуризм, апитуризм, этнокультурный туризм и многие др. [Рудченко, 2021]. Многие горные регионы России, особенно на Кавказе, Алтае, Урале, Дальнем Востоке характеризуются полиэтничностью и поликонфессиональностью, что формирует основу богатейшего ресурсного потенциала и создает перспективы для развития этнокультурного туризма [Забураева и др., 2023].

Преимущество горных регионов заключается во всесезонном характере. К примеру, в российской части Кавказского региона возможна круглогодичная рекреационная деятельность [Виноградова, 2022]. Здесь начата реализация проектов по формированию всесезонных туристско-рекреационных комплексов на территории Чечни (Ведучи), Ингушетии (Армхи и Цори), Дагестана (Матлас и Каспийский прибрежный кластер), Северной Осетии-Алании (Мамисон), Карачаево-Черкесии (Архыз) и Кабардино-Балкарии (Эльбрус). В контексте оздоровительного и природоориентированного туризма следует упомянуть о достаточно распространенном прогулочно-промысловом туризме. Его потенциал в условиях Пермского края оценивается в работе В.П. Расковалова [Расковалов, 2016].

Агротуризм – перспективное направление экотуризма в исследуемых регионах, поскольку в большинстве из них преобладает сельское население. Создание сети гостевых домов, включая отдаленные горные села без высокой стоимости инфраструктуры и с учетом высокого уровня гостеприимства горцев позволит повысить и уровень занятости населения. Успешно в горных регионах может развиваться сырный туризм, именуемый казетуризмом [Ermolaev et al., 2019]. Производство сыра сосредоточено на Алтае, Кавказе и др. регионах. В горных районах Чечни и Дагестана с давних времен изготавливаются различные виды сыра порой по своему осо-

бенному рецепту и эти знания передаются из поколения в поколение. Речь не идет о налаживании процесса производства сыра в промышленных масштабах, однако развитие сырного туризма окажет существенную поддержку местному населению. Также здесь большой потенциал для развития апитуризма, поскольку горцы с давних времен занимаются пчеловодством.

На Северном Кавказе в области развития агротуризма наибольшую активность проявляет Республика Северная Осетия-Алания, которая состоит в числе первых регионов России, где принят закон о горных территориях. Здесь создан «Центр развития экологического и сельского туризма», куда могут обращаться жители, желающие принимать в своих домах туристов, и функционирует около 25 гостевых домов [Косарева, 2020].

В числе перспективных и наиболее развитых направлений экотуризма – спелеотуризм (Алтайский, Красноярский, Хабаровский края, Челябинская область и др.). В ряде регионов он представлен несколькими направлениями. В Крыму, к примеру, включает экскурсионную и экстремально-спортивную разновидности [Гулиева и др., 2021]. На северо-востоке Кавказа спелеотуризм имеет большие перспективы, но практически не развит [Забураева и др., 2023].

Особую актуальность в горных регионах России обретает и другая разновидность экотуризма – геологический туризм, представляющий собой путешествия с целью получения знаний в области геологии и геоморфологии [Забураева и др., 2023]. Его объектами могут быть как уникальные формы рельефа, каньоны, водопады, обрывистые берега, так и гейзеры, вулканы. Наличием последних на фоне остальных горных регионов России выгодно отличается Камчатский край, что создает предпосылки для специфических видов экотуризма [Завадская и др., 2021]. В Приморском крае свыше трех десятков небольших и мелких островов (многие из которых необитаемы) с аттрактивными ландшафтами и берегами, большим количеством бухт, что создает предпосылки для островного туризма [Воликов, Ковалев, 2020].

Основу для развития экотуризма создают природные ресурсы. Эстетика ландшафта, к примеру, расценивается как особо важный природный ресурс, обладающий оздоровительными свойствами. При этом не отрицается важная роль наличия необходимой туристской инфраструктуры. Зачастую в качестве комплексного природного ресурса для экотуризма рассматриваются ООПТ [Huseynzade, 2023], хотя экотуризм может развиваться и вне границ ООПТ. Одна из перспективных форм экотуризма в горных регионах России – охотничий туризм, предполагающий строго нормированную охоту на диких животных, птиц и рыбалку.

В России степень вовлеченности ООПТ в развитие экотуризма по сравнению с США, странами Западной Европы остается крайне низкой [Шабалина и др., 2021]. Еще более в зачаточном состоянии она остается в горных регионах, несмотря на значительный потенциал. Сравнительный анализ количества и площадей ООПТ в регионах Северо-Кавказского федерального округа с аналогичными показателями в ряде других горных регионов России выявил значительные различия (табл. 2). Доля площади всех ООПТ от общей площади территории региона варьирует в пределах – от 1,6% в Ставропольском крае до 37,9 % в Якутии. Дифференцированный подход к концепции заповедного дела прослеживается и в северо-кавказских республиках. В Ингушетии, Северной Осетии-Алании и Карачаево-Черкесии около 1/5 части территории занимают ООПТ, а в Кабардино-Балкарии – около 1/3. В Чечне площади

ООПТ значительно сократились в связи со строительством туристско-рекреационного комплекса «Ведучи». В настоящее время их значения здесь минимальны (6,9%), как и в соседней республике Дагестан (13,6%), где свыше двух третей охраняемой территории приходится на водные бассейны.

В регионах Северо-Кавказского федерального округа общая площадь ООПТ федерального значения составляет 766,4 тыс. га, в т.ч. Тебердинский государственный природный биосферный заповедник, государственные природные заповедники (Дагестанский, Северо-Осетинский и Эрзи) и заказники (Аграханский, Самурский, Тляратинский, Даутский, Ингушский, Цейский и др.). Площадь ООПТ регионального и местного значения составляет 1019,7 тыс. га.

Таблица 2 / Table 2

**Соотношение количества и площадей особо охраняемых природных территорий
в горных регионах России /**
**Ratio of the number and areas of specially protected natural territories
in mountainous regions of Russia**

№ п/п	Регион / Region	ООПТ, количество / number of specially protected natural areas	Общая площадь ООПТ, тыс. га / total area of specially protected natural areas, thousand hectares	Доля от общей площади, % / Share of total area, %
1	Адыгея / Adygeya	19	116,3	14,9
2	Алтай / Altai	58	2370,4	25,5
3	Башкортостан / Bashkortostan	217	986,0	6,9
4	Бурятия / Buryatia	84	3151,4	9,0
5	Дагестан / Dagestan	53	682,7	13,6
6	Ингушетия / Ingushetia	2	69,4	19,1
7	Карачаево-Черкесия / Karachay-Cherkessia	70	310,8	21,8
8	Кабардино-Балкария / Kabardino-Balkaria	32	336,5	27,0
9	Крым / Crimea	204	226,4	8,7
10	Северная Осетия-Алания / North Ossetia-Alania	222	166,6	20,9
11	Ставропольский край / Stavropol Territory	112	108,3	1,6
12	Саха (Якутия) / Sakha (Yakutia)	237	116789,0	37,9
13	Тыва / Tuva	33	2040,2	12,1
14	Хакасия / Khakassia	17	931,5	15,1
15	Чечня / Chechnya	50	111,9	6,9

Источник: составлено по данным государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году» / *Source:* compiled according to the state report “On the State and Protection of the Environment of the Russian Federation in 2022”

В числе региональных ООПТ Северного Кавказа – государственные природные заказники (Турмонский, Заманкульский, Советский, Веденский, Степной, Шалинский, Бежтинский, Дешлагарский, Касумкентский, Каякентский, Кособско-Келебский, Чегемский и многие др.), природный парк Верхний Гуниб и разнообразные ландшафтные, геологические, палеогеоморфологические, гидрологические, ботанические памятники природы с многочисленными эндемичными и реликтовыми видами животных и растений.

Среди особо охраняемых природных объектов Северного Кавказа весьма значима роль Сулакского каньона и озера Кезеной-Ам, широко известных российским и иностранным туристам. Первый впечатляет своей грандиозностью и красотой. Его максимальная глубина достигает 1920 м, а длина свыше 53 км. Часто его сравнивают со знаменитым Большим каньоном реки Колорадо в США, которому Сулакский каньон уступает по протяженности, но по глубине превосходит его (рис. 1). Благодаря возможностям для активного отдыха (сплав по реке, альпинизм, парашютизм и др.) он становится центром экстремального туризма на северо-востоке Кавказа. Сулакский каньон – это природное чудо Кавказа и объект, представляющий значительный интерес не только для туристско-рекреационной сферы, но и для научных исследований в силу уникальных геолого-геоморфологических условий и разнообразия флоры и фауны.



Рис. 1. Сулакский каньон и его окрестности, 2024 г. (фото Х.Ш. Забуровой) /
Fig. 1. Sulak Canyon and its surroundings, 2024 (photo by Kh.Sh. Zaburaeva)

Озеро Кезеной-Ам – самый крупный высокогорный гидрологический объект на Северном Кавказе. Оно расположено на южном склоне Андийского хребта в зоне горных альпийских лугов на высоте 1869 м н.у.м. на границе Чечни и Дагестана (рис. 2). В последние годы в окрестностях озера проведена колоссальная работа по созданию туристско-рекреационного комплекса (строительство гостиничного комплекса, модернизация транспортной инфраструктуры, оборудование спортивных площадок и др.). Вместе с тем вызывает беспокойство рост антропогенной

нагрузки на данную экосистему, который обусловлен как организованным, так и стихийным туризмом и рекреацией.



Рис. 2. Высокогорное озеро Кезеной-Ам, 2024 г. (фото А.А. Шаиповой) /

Fig. 2. High-mountain lake Kezenoi-Am (photo by A.A. Shaipova)

Согласно официальным статистическим данным только за последние несколько лет туристский поток в Чечню и Дагестан возрос в 2–3 раза, а рассматриваемые объекты значатся в числе самых популярных туристических объектов этих регионов. Продолжение наметившихся тенденций может способствовать ухудшению геоэкологического состояния этих и других уникальных горных экосистем за счет загрязнения, нарушения экологического равновесия. Это подтверждает необходимость научно-обоснованного подхода к планированию и развитию туризма и рекреации в горных районах. В качестве превентивных мер следует обратиться к зарубежному опыту по сохранению и восстановлению озерных экосистем (озеро Шамплейн на границе США и Канады, Онтарио в Канаде, Балатон в Венгрии и др.), предусматривающему комплекс решений (включая мониторинг акваторий) при участии различных субъектов – от муниципальных и региональных властей, научно-образовательных учреждений, департаментов охраны окружающей среды до коммунальных служб, который отражен в итоговом отчете Экоцентра «Заповедники» по проекту «Оценка экологических и социальных проблем Байкальской природной территории».

Современные исследования подтверждают, что в контексте стремительного развития горного туризма необходимо ориентироваться на сбалансированность связей между давлением туристической деятельности и экологической защитой в уязвимых горных районах [Du et al., 2024].

Выводы

Концепция экологического туризма зародилась еще в конце XX в., однако наибольшее развитие получила в последние десятилетия и в вопросах формирования теоретико-методологической базы, и в прикладном аспекте. Значительных успехов

в сфере развития экотуризма достигли некоторые развитые страны Европы и США. Экологический туризм нацелен на сохранение уникальных природных комплексов, снижение негативного воздействия на природную среду, стимулирование экономического развития и создание благоприятных условий для жизни и деятельности местного населения.

Особую актуальность вышеперечисленные задачи обретают в условиях горных территорий, отличающихся от равнинных внешними геоморфологическими особенностями, эндогенными процессами, глубинным строением, большей выраженностью геоэкологических рисков и, как правило, отстающих в социально-экономическом развитии. В этой связи горный экотуризм призван решать двойную проблему горных районов: сокращения бедности и минимизации деградации горных ландшафтов.

Горные регионы России обладают значительным потенциалом для развития различных направлений экотуризма: научного, познавательного, этнографического, гастрономического, агротуризма, апитуризма, геотуризма и многих других, как на ООПТ, так и за их пределами. Разработка программ развития экотуризма должна осуществляться с учетом зарубежного опыта, избегая при этом шаблонных подходов. К примеру, будет полезным опыт ряда альпийских регионов по использованию инновационных подходов к развитию и управлению горным экотуризмом [Nepal, 2002]. Природные ресурсы создают основу для развития рекреационной сферы, а их научно-обоснованное использование и охрана играют ключевую роль в развитии экотуризма. Для исследуемых регионов также полезным будет опыт организации туризма и рекреации в пределах Байкальской природной территории, в частности, посредством реализации механизмов государственно-частного партнерства.

В России экологический туризм слабо развит, хотя курс в этом направлении взят. В горных регионах развитие экотуризма сдерживается многими факторами. Для более устойчивого (сбалансированного) развития экологического туризма необходимо:

- разработать понятийный аппарат, критерии и индикаторы горного экотуризма, что позволит избегать бессистемного использования понятия;
- развивать туристскую инфраструктуру, улучшать сервис;
- разработать единую систему продвижения экологического туризма как национального экологического бренда;
- вовлекать в процесс формирования, продвижения и реализации экотуров и иные отрасли экономики (сельское хозяйство, предприятия малого и среднего бизнеса и др.);
- внедрять инновационные идеи в экотуризм;
- вовлекать в экотуристическую деятельность местное население;
- устанавливать межсистемные и межрегиональные связи в сфере экотуризма и др.

Решение вышеуказанных и других сопутствующих проблем – длительный и трудоемкий процесс. Однако это позволит развивать социально-экономическую сферу, обеспечить охрану уникальных горных ландшафтов и положительно отразится на занятости этих трудоизбыточных регионов. В долгосрочной перспективе горные регионы России могут стать центрами как внутреннего, так и международного экологического туризма.

Литература

1. Виноградова В.В. Воздействие погодных условий на туристический потенциал Кавказского региона. // Известия РАН. Серия географическая. – 2022. – № 5. – С. 799–814. DOI: 10.31857/S2587556622050144.
2. Воликов О.А., Ковалев Р.С. Приморский край как центр развития экологического туризма на Дальнем Востоке. // Азимут научных исследований: экономика и управление. – 2020. – Т. 9. № 2. – С. 187–190. DOI: 10.26140/anie-2020-0902-0043.
3. Гулиева С.Н., Кричевец Е.А., Кудревич В.В. Формирование регионального туристско-рекреационного комплекса Республики Крым и города Севастополя. // Экономика и управление: теория и практика. – 2021. – Т. 7. № 1. – С. 5–16.
4. Дабиев Д.Ф. Оценка развития горных регионов России. // Горная промышленность. – 2022. – № 2. – С. 81–83. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-2-81-83.
5. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Шманатов Г.В. Геоэкологические аспекты формирования интенсивности землетрясения на основе инструментальных данных. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 45–60. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004.
6. Забураева Х.Ш., Забураев Ч.Ш., Седиева М.Б. Геологический и этнокультурный туризм: перспективы сопряженного развития на Северо-Восточном Кавказе. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 149–160. DOI: 10.46698/VNC.2023.14.67.012
7. Завадская А.В., Лебедева Е.В., Чижова В.П. Механизмы регулирования туристских потоков в долине гейзеров (Камчатка). // Вестник Московского ун-та. Сер. 5: География. – 2021. – № 5. – С. 63–77.
8. Косарева Н.В. Экологический туризм в Северной Осетии как фактор устойчивого развития республики. // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2020. – № 5. – С. 103–114. DOI: 10.17513/vaael.1117.
9. Котляков В.М., Баденков Ю.П. Развитие горных регионов России: к 20-летию саммита ООН в Рио-де-Жанейро и 10-летию горного саммита в Бишкеке. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2010. – № 3. – С. 14–21.
10. Кундиус В.А., Миронова О.Л. Развитие экологического туризма в Алтайском крае. // Наука и образование Большого Алтая. – 2022. – № 2. – С. 26–35. DOI: 10.25712/ASTU.2410-485X.2022.02.
11. Мельченко В.Е., Хрисанов В.Р., Митенко Г.В., Юрин В.О., Снакин В.В. Анализ ландшафтного разнообразия России. // Использование и охрана природных ресурсов в России. – 2004. – № 4. – С. 38–46.
12. Расковалов В.П. Потенциал прогулочно-промыслового туризма в Пермском крае. // Известия РАН. Серия географическая. – 2016. – № 3. – С. 88–96. DOI: 10.15356/0373-2444-2016-3-88-9.
13. Рудченко Ю.И. География экологического туризма в России: современное состояние и перспективы развития. // Материалы Международной научно-практической конференции «Зеленый туризм в России: современное состояние, проблемы и перспективы развития», Москва, 16 октября 2020 г. М.: РЭУ имени Г.В. Плеханова, 2021. – С. 119–124.
14. Шабалина Н.В., Никанорова А.Д., Александрова Е.Е. Экологический туризм: особенности и проблемы развития в России. // Вестник Ассоциации вузов туризма и сервиса. – 2021. – Т. 15. № 1. – С. 4–14.
15. Baloch Q.B., Shah S.N., Iqbal N. et al. Impact of tourism development upon environmental sustainability: a suggested framework for sustainable ecotourism. // Environmental Science and Pollution Research. – 2023. – Vol. 30. – pp. 5917–5930. DOI: 10.1007/s11356-022-22496-w.
16. Cervený L.K. Sustainable recreation and tourism: Making sense of diverse conceptualizations and management paradigms. // Journal of Outdoor Recreation and Tourism. – 2022. – Vol. 38. 100520. DOI: 10.1016/j.jort.2022.100520.

17. Du Q., Guan Q., Sun Y., Wang Q. Assessment of Ecotourism Environmental Carrying Capacity in the Qilian Mountains, Northwest China. // *Sustainability*. – 2024. – Vol. 16. No. 5. 1873. DOI: 10.3390/su16051873.
18. Ermolaev V.A., Yashalova N.N., Ruban D.A. Cheese as a tourism resource in Russia: the first report and relevance to sustainability. // *Sustainability*. – 2019. – Vol. 11. Issue 19. DOI: 10.3390/su11195520.
19. Fadafan F.K., Soffianian A., Pourmanafi S., Morgan M. Assessing ecotourism in a mountainous landscape using GIS–MCDA approaches. // *Applied Geography*. – 2022. – Vol. 147. DOI: 10.1016/j.apgeog.2022.102743.
20. Huseynzade A.I. Ecotourism potential and ways of its usage in the mountainous areas of Azerbaijan (the case of the Shaki-Zagatala economic-geographical region). // *Services in Russia and Abroad*. – 2023. – Vol. 17. No. 1. – pp. 139–146. DOI: 10.5281/zenodo.7793478.
21. Jones P. Tourism and biodiversity: a paradoxical relationship. // *Athens Journal of Tourism*. – 2022. – Vol. 9. No. 3. – pp. 151–162. DOI: 10.30958/ajt.9-3-2.
22. Nepal S.K. Mountain ecotourism and sustainable development: ecology, economics, and ethics. // *Mountain Research and Development*. – 2002. – Vol. 22. No. 2. – pp. 104–109. DOI: 10.2307/3674310.
23. Perrigo A., Hoorn C., Antonelli A. Why mountains matter for biodiversity. // *Journal of Biogeography*. – 2020. – Vol. 47. Issue 2. – pp. 315–325. DOI: 10.1111/jbi.13731.
24. Zeng L., Li R.Y.M., Nuttapong J., Sun J., Mao Y. Economic development and mountain tourism research from 2010 to 2020: Bibliometric analysis and science mapping approach. // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14. No. 1:562. DOI: 10.3390/su14010562.

References

1. Vinogradova V.V. Impact of weather conditions on tourist potential of the Caucasus Region. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography Series*. 2022. No. 5. pp. 799–814. DOI: 10.31857/S2587556622050144. (In Russ.)
2. Volivok O.A., Kovalev R.S. Primorsky krai as a center for the development of ecological tourism in the Far East. *Azimuth of Scientific Research: Economics and Administration*. 2020. Vol. 9. No. 2. pp. 187–190. DOI: 10.26140/anie-2020-0902-0043. (In Russ.)
3. Gulieva S.N., Krichevets E.A., Kudrevich V.V. Formation of the regional tourist and recreational complex of the Republic of Crimea and Sevastopol. *Economics and Management: theory and practice*. 2021. Vol. 7. No. 1. pp. 5–16. (In Russ.)
4. Dabiev D.F. Assessment of the development of the mountain regions of Russia. *Russian Mining Industry Journal*. 2022. No. 2. pp. 81–83. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-2-81-83 (In Russ.)
5. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Shmanatov G.V. Geoecological aspects of earth-quake 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.)
6. Zaburaeva Kh.Sh., Zaburaev Ch.Sh., Sedieva M.B. Geological and ethnocultural tourism: prospects for interrelated development in the North-Eastern Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 149–160. DOI: 10.46698/VNC.2023.14.67.012. (In Russ.)
7. Zavadskaya A.V., Lebedeva E.V., Chizhova V.P. Mechanisms of tourist flows regulation in the valley of geysers (Kamchatka). *Bulletin of the Moscow University. Geography Series*. 2021. No. 5. pp. 63–77. (In Russ.)
8. Kosareva N.V. Ecotourism in North Ossetia as a factor of sustainable development of the republic. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and law*. 2020. No. 5. pp. 103–114. DOI: 10.17513/vaael.1117. (In Russ.)
9. Kotlyakov V.M., Badenkov Yu.P. Development of the mountainous regions of Russia: to the 20th anniversary of the UN summit in Rio de Janeiro and the 10th anniversary of the Mountain

Summit in Bishkek. Sustainable development of mountain territories. 2010. No. 3. pp. 14–21. (In Russ.)

10. Kundius V.A., Mironova O.L. Development of ecological tourism in the Altai territory. Grand Altai Research & Education. 2022. No. 2. pp. 26–35. DOI: 10.25712/ASTU.2410-485X.2022.02 (In Russ.)

11. Melchenko V.E., Khrisanov V.R., Mitenko G.V., Yurin V.O., Snakin V.V. Russian landscape diversity analysis. Use and protection of natural resources in Russia. 2004. No. 4. pp. 38–46. (In Russ.)

12. Raskovalov V.P. Potential for recreational-commercial tourism in Perm Krai. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography Series. 2016. No. 3. pp. 88–96. DOI: 10.15356/0373-2444-2016-3-88-96. (In Russ.)

13. Rudchenko Yu.I. Geography of ecological tourism in Russia: current state and development prospects. In: Conf. Green tourism in Russia: current state, problems and development prospects. Moscow. G.V. Plekhanov Russian University of Economics. 2021. pp. 119–124. (In Russ.)

14. Shabalina N.V., Nikanorova A.D., Aleksandrova E.E. Ecological tourism: features and problems of development in Russia. Bulletin of the Association of Universities for Tourism and Service. 2021. Vol. 15. No. 1. pp. 4–14. (In Russ.)

15. Baloch Q.B., Shah S.N., Iqbal N. et al. Impact of tourism development upon environmental sustainability: a suggested framework for sustainable ecotourism. Environmental Science and Pollution Research. 2023. Vol. 30. pp. 5917–5930. DOI: 10.1007/s11356-022-22496-w.

16. Cerveny L.K. Sustainable recreation and tourism: Making sense of diverse conceptualizations and management paradigms. Journal of Outdoor Recreation and Tourism. 2022. Vol. 38. 100520. DOI: 10.1016/j.jort.2022.100520.

17. Du Q., Guan Q., Sun Y., Wang Q. Assessment of Ecotourism Environmental Carrying Capacity in the Qilian Mountains, Northwest China. Sustainability. 2024. Vol. 16. No. 5. 1873. DOI: 10.3390/su16051873.

18. Ermolaev V.A., Yashalova N.N., Ruban D.A. Cheese as a tourism resource in Russia: the first report and relevance to sustainability. Sustainability. 2019. Vol. 11. Issue. 19. DOI: 10.3390/su11195520.

19. Fadafan F.K., Soffianian A., Pourmanafi S., Morgan M. Assessing ecotourism in a mountainous landscape using GIS–MCDA approaches. Applied Geography. 2022. Vol. 147. DOI: 10.1016/j.apgeog.2022.102743.

20. Huseynzade A.I. Ecotourism potential and ways of its usage in the mountainous areas of Azerbaijan (the case of the Shaki-Zagatala economic-geographical region). Services in Russia and Abroad. 2023. Vol. 17. No. 1. pp. 139–146. DOI: 10.5281/zenodo.7793478.

21. Jones P. Tourism and biodiversity: a paradoxical relationship. Athens Journal of Tourism. 2022. Vol. 9. No. 3. pp. 151–162. DOI: 10.30958/ajt.9-3-2.

22. Nepal S.K. Mountain ecotourism and sustainable development: ecology, economics, and ethics. Mountain Research and Development. 2002. Vol. 22. No. 2. pp. 104–109. DOI: 10.2307/3674310.

23. Perrigo A., Hoorn C., Antonelli A. Why mountains matter for biodiversity. Journal of Biogeography. 2020. Vol. 47. Issue 2. pp. 315–325. DOI: 10.1111/jbi.13731.

24. Zeng L., Li R.Y.M., Nuttapong J., Sun J., Mao Y. Economic development and mountain tourism research from 2010 to 2020: Bibliometric analysis and science mapping approach. Sustainability. 2022. Vol. 14. No. 1:562. DOI: 10.3390/su14010562.

УДК 621.039

DOI: 10.46698/VNC.2025.80.31.016

Оригинальная статья

Режим работы в бассейне выдержки Билибинской атомной электростанции при реализации различных неблагоприятных сценариев

Р.В. Ключев¹, В.Б. Заалишвили², И.Д. Музаев², А.А. Гаврилова¹

¹ Московский политехнический университет, Россия,
107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, 38,
e-mail: kluev-roman@rambler.ru;

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

Статья поступила: 28.01.2025, доработана: 03.03.2025, принята к публикации: 07.03.2025

Резюме: **Актуальность работы.** На сегодняшний день только малая часть накопленного топлива (~5%) и часть ежегодно образующегося отработанного ядерного топлива на атомной электростанции отправляется на специализированный завод для регенерации. В связи с чем и возникла потребность в хранилищах с большой емкостью, которые смогут вмещать в себя все необходимые отходы при обеспечении высоких стандартов безопасности. Одним из основных способов увеличения места для захоронения является переход на схему более уплотненного хранения тепловыделяющих сборок (ТВС) в бассейнах выдержки. В то же время при увеличении тепловыделяющих сборок растет и количество выделяемого тепла. **Целью работы** является определение температурного режима в бассейне выдержки №4 Билибинской АЭС при реализации различных неблагоприятных сценариев для обеспечения долгосрочного безопасного хранения ядерных отходов. В связи с этим сформированы задачи исследования: рассчитать время до повреждения ТВС в бассейне выдержки Билибинской АЭС, рассчитать время до критического предаварийного состояния БВ-4. **Методы.** Аналитические исследования проведены на основе сочетания численных методов математического моделирования и построения регрессионных моделей. **Результаты.** Поставлена и решена начально-краевая задача математической физики, моделирующая температурно-тепловые процессы в тепловыделяющих сборках, погруженных в бассейн выдержки с принудительным охлаждением. Приведен расчет температурных режимов в бассейне выдержки №4 на Билибинской АЭС. Рассмотрены изменения температуры ТВС в бассейне выдержки №4 при условиях: 1) снижение уровня воды до головок тепловыделяющих сборок, 2) оголение тепловыделяющих сборок на 25%, 3) оголение тепловыделяющих сборок на 50%.

Ключевые слова: Билибинская атомная станция, бассейн выдержки, отработанное ядерное топливо, тепловыделяющие сборки, начально-краевая задача, трехкратные тригонометрические ряды Фурье.

Для цитирования: Ключев Р.В., Заалишвили В.Б., Музаев И.Д., Гаврилова А.А. Режим работы в бассейне выдержки Билибинской атомной электростанции при реализации различных неблагоприятных сценариев. // *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 194-207 DOI: 10.46698/VNC.2025.80.31.016

DOI: 10.46698/VNC.2025.80.31.016

Original paper

Operation mode in the spent fuel pool of the Bilibino nuclear power plant under the implementation of various unfavorable scenarios

R.V. Klyuev¹, V.B. Zaalishvili², I.D. Muzaev², A.A. Gavrilova¹

¹ Moscow Polytechnic University, 38 B. Semenovskaya Str.,
Moscow 107023, Russian Federation,
e-mail: kluev-roman@rambler.ru;

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

Received: 28.01.2025, revised: 03.03.2025, accepted: 07.03.2025

Abstract: Relevance. Today, only a small part of the accumulated fuel (~5%) and a part of the annually generated spent nuclear fuel at a nuclear power plant is sent to a specialized plant for regeneration. In connection with this, the need arose for storage facilities with large capacities that can accommodate all the necessary waste while ensuring high safety standards. One of the main ways to increase disposal space is to switch to a more compact storage scheme for fuel assemblies (FA) in cooling pools. At the same time, as the fuel assemblies increase, the amount of heat generated also increases. **The aim** of the study is to determine the temperature regime in the spent fuel pool No. 4 of the Bilibino NPP under the implementation of various unfavorable scenarios, to ensure long-term safe storage of nuclear waste. In this regard, the research objectives were formed: to calculate the time until fuel assemblies are damaged in the spent fuel pool of the Bilibino NPP, to calculate the time until the critical pre-accident state of BV-4. **Methods.** Analytical studies were conducted based on a combination of numerical methods of mathematical modeling and construction of regression models. **Results.** The initial-boundary value problem of mathematical physics modeling temperature-thermal processes in fuel assemblies immersed in a spent fuel pool with forced cooling is formulated and solved. The temperature regimes in spent fuel pool No. 4 at the Bilibino NPP are calculated. Changes in the temperature of fuel assemblies in spent fuel pool No. 4 are considered for: 1) a decrease in the water level to the heads of fuel assemblies, 2) exposure of fuel assemblies by 25%, 3) exposure of fuel assemblies by 50%.

Keywords: Bilibino nuclear power plant, spent fuel pool, spent nuclear fuel, the inventive fuel assembly, initial boundary value problem, three-fold trigonometric Fourier series.

For citation: Klyuev R.V., Zaalishvili V.B., Muzaev I.D., Gavrilova A.A. Operation mode in the spent fuel pool of the Bilibino nuclear power plant under the implementation of various unfavorable scenarios. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 194-207. DOI: 10.46698/VNC.2025.80.31.016

Введение

Основным принципом, положенным в основу проектирования систем обращения с ядерными отходами, является обеспечение ядерной и радиационной безопасности при нормальном функционировании системы, а также снижение радиационного воздействия при проектных и запроектных авариях [Chierici et al., 2025]. В связи с этим наиболее актуальными проблемами для ядерной энергетики являются: а) вопросы переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ); б) сложность в длительном хранении отработанного топлива.

Основными нерешенными вопросами являются: где хранить топливо, каким способом (в каком виде), насколько долгосрочным должно быть данное хранение.

На сегодняшний день только малая часть накопленного топлива (~5%) и часть ежегодно образующегося отработанного ядерного топлива на АЭС отправляется на специализированный завод для регенерации. В связи, с чем и возникла потребность в хранилищах с большой емкостью, которые смогут вмещать в себя все необходимые отходы при обеспечении высоких стандартов безопасности.

В рассматриваемом хранилище находятся 4 бассейна выдержки с проектной вместимостью 836 тепловыделяющих сборок (ТВС), но со временем данный параметр был повышен до 2030 ТВС (за счет более уплотненного размещения). ТВС хранятся в стальных пеналах 108×4 с минимальным шагом 115×177 мм в прямоугольной решетке. Герметичные пеналы с ТВС заполнены азотом, а само хранилище заполнено водой. После полного заполнения хранилища оно осушается.

Одним из основных способов увеличения места для захоронения является переход на схему более уплотненного хранения ТВС в бассейнах выдержки. В то же время при увеличении тепловыделяющих сборок растет и количество выделяемого тепла. Решению задач моделирования тепловых режимов ТВС при долгосрочном хранении отходов посвящено много работ [Колпаков, Селиваникова, 2009; Morrison, Parks, 2020; Сергеев, 2021]. В рамках существующих численных методов решения подобных задач, кроме зарубежных аналогов [Kile et al., 2024; Gauld, Murphy, 2010] существует и ряд прогрессивных отечественных ПО (Ядерный калькулятор ЭГП-6 2.0. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019617782, 2019 г.) [Жердев, Суворов, 2020; Бедретдинов М.М., Степанов, 2021]. В отличие от программ на основе метода конечных элементов [ANSYS ..., 2013; Brigida et al., 2024], методов машинного обучения [Моргоева и др., 2022; Ключев и др., 2023; Klyuev et al., 2022] или трехмерных регрессионных моделей функции отклика [Бригида и др., 2019; Brigida et al., 2022] в большинстве случаев используются более простые методы [Karami et al., 2025]. И, тем не менее, методология прогноза температурных режимов ТВС при различных проявлениях неблагоприятных условий нуждается в совершенствовании.

В связи с этим целью работы, является определение температурного режима в бассейне выдержки №4 Билибинской АЭС при реализации различных неблагоприятных сценариев, для обеспечения долгосрочного безопасного хранения ядерных отходов. В связи с этим сформированы задачи исследования: рассчитать время до повреждения ТВС в бассейне выдержки Билибинской АЭС, рассчитать время до критического предаварийного состояния БВ-4.

Материалы и методы

Объектом исследования является хранилище Билибинской АЭС, а именно бассейн выдержки №4 (БВ-4) Билибинской АЭС. Аналитические исследования проведены на основе сочетания численных методов математического моделирования и наименьших квадратов (построение регрессионных моделей) по аналогии с работами [Golik et al., 2020; Maluykova et al., 2023]. При этом, несомненно, имеет значение возможность непосредственных инструментальных измерений соответствующих сложных явлений [Заалишвили, Голик, 2024; Заалишвили и др., 2013, 2014; Голик, Бурдзиева, 2023].

Для расчета параметров бассейна выдержки осуществляли расчет: 1) размера бассейна выдержки; 2) объема самого БВ-4; 3) объема воды в БВ-4. Для определения времени разогрева и закипания воды в БВ-4 рассчитывалось: 1) количество теплоты, которое выделяется кассетами после их погружения в БВ-4; 2) время разогрева воды в БВ-4; 3) время выпаривания воды в БВ-4; 4) время до закипания воды.

Основные формулы, используемые в работе.

Расчет количества теплоты, выделяемого при охлаждении:

$$Q = (C \cdot m_b)(t_2 - t_1), \quad (1)$$

Определение времени нагрева воды (t_p), ч:

$$t_p = \frac{m \cdot c \cdot \Delta \vartheta}{P \cdot \eta}, \quad (2)$$

где: m – количество воды (кг); P – мощность (Вт); η – КПД; $\Delta \vartheta$ – разность температур (К),

$$\Delta \vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2, \quad (3)$$

где: ϑ_2 – температура холодной воды (°C); ϑ_1 – температура горячей воды (°C).

Время испарения воды в БВ-4:

$$t_i = \frac{N}{L}; \quad (4)$$

Время закипания воды в БВ-4:

$$t_B = \frac{S \cdot \Delta H \cdot \rho}{G} \quad (5)$$

Постановка и решение начально-краевой задачи, моделирующей температурные процессы в тепловыделяющей сборке, погруженной в бассейн выдержки

В прямоугольной системе координат $oxyz$ часть пространства ограниченная условиями $0 \leq x \leq L_1, 0 \leq y \leq L_2, 0 \leq z \leq L_3$ занята индивидуальной тепловыделяющей сборкой погруженной в бассейн выдержки с принудительным охлаждением. Процесс выделения тепла в бассейне выдержки и охлаждения моделируется следующей начально-краевой задачей математической физики [Краснов и др., 2004; Музаев и др., 2016, 2024]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) + \frac{W_0}{c\rho} e^{-\gamma t}, \quad (6)$$

$$U(x, y, z, t)|_{t=0} = U_0, \quad U = U^* \text{ при } x = 0, x = L_1, y = 0, y = L_2, z = 0, z = L_3, \quad (7)$$

где приняты следующие обозначения и предположения: $U(x, y, z, t)$ – нестационарное температурное поле в сборке, a – коэффициент температуропроводности материала сборки, c – коэффициент теплоемкости, ρ – плотность, W_0 – начальная тепловыделяющая мощность сборки, t – время, γ – декремент затухания тепловыделяющей мощности сборки, (x, y, z, t) – координаты точки в пространстве сборки, U_0 – температура сборки в момент погружения, U^* – температура принудительно

охлаждающей воды в бассейне выдержки. Конфигурация сборки геометрически скомпонована в виде параллелепипеда с размерами L_1 , L_2 , L_3 . Расчетная схема поставленной задачи (6)–(7) представлена на рисунке 1.

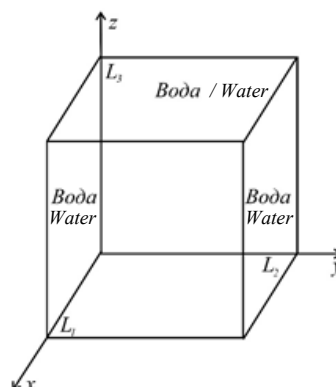


Рис. 1. Расчетная схема поставленной начально-краевой задачи /
Fig. 1. Calculation scheme of the initial boundary value problem

Поставленная пространственная начально-краевая задача решена методами трехкратных тригонометрических рядов Фурье [Краснов и др., 2004; Музаев и др., 2016, 2024] в следующей последовательности:

$$U(x, y, z, t) = U^* + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} U_{n,m,k}(t) \sin a_n x \sin a_m y \sin a_k z, \quad (8)$$

$$a_n = \frac{n\pi}{L_1}, a_m = \frac{m\pi}{L_2}, a_k = \frac{k\pi}{L_3}, \quad (9)$$

$$\frac{dU_{n,m,k}(t)}{dt} + a \lambda_{n,m,k}^2 U_{n,m,k} = \frac{W_0}{c\rho} e^{-\gamma t} \cdot \alpha_{n,m,k}, \quad (10)$$

$$U_{n,m,k}(t)|_{t=0} = (U_0 - U^*) \cdot \alpha_{n,m,k}, \quad (11)$$

$$\alpha_{n,m,k} = \frac{8}{L_1 L_2 L_3} \cdot \frac{1 - \cos n\pi}{a_n} \cdot \frac{1 - \cos m\pi}{a_m} \cdot \frac{1 - \cos k\pi}{a_k}, \quad (12)$$

$$U_{n,m,k}(t) = \left\{ \left[U_0 - U^* - \frac{W_0}{c\rho(a \cdot \lambda_{n,m,k}^2 - \gamma)} \right] \cdot e^{-a \cdot \lambda_{n,m,k}^2 t} + \frac{W_0}{c\rho(a \cdot \lambda_{n,m,k}^2 - \gamma)} e^{-\gamma t} \right\} \alpha_{n,m,k} \quad (13)$$

Температурное нестационарное поле вычисляется по совокупности расчетных формул (8)–(13).

Для средней температуры сборки получается следующая расчетная формула:

$$U_{cp}(t) = \frac{1}{L_1 L_2 L_3} \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} \int_0^{L_3} U(x, y, z, t) dx dy dz, \quad (14)$$

$$U_{cp}(t) = \frac{1}{L_1 L_2 L_3} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} U_{n,m,k}(t) \frac{1 - \cos n\pi}{a_n} \cdot \frac{1 - \cos m\pi}{a_m} \cdot \frac{1 - \cos k\pi}{a_k},$$

Для мощности теплового потока, текущего от сборки к охлаждающей воде в бассейне выдержки получена следующая расчетная формула:

$$W(t) = -ac\rho \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} U_{n,m,k}(t) \left[a_n(1 + \cos n\pi) \cdot \frac{1 - \cos m\pi}{a_m} \cdot \frac{1 - \cos k\pi}{a_k} + \right. \\ \left. + a_m(1 + \cos m\pi) \frac{1 - \cos n\pi}{a_n} \cdot \frac{1 - \cos k\pi}{a_k} + a_k(1 + \cos k\pi) \frac{1 - \cos n\pi}{a_n} \cdot \frac{1 - \cos m\pi}{a_m} \right] \quad (15)$$

Для количества тепла, отданного сборкой охлажденной воде в промежутке времени ее нахождения в бассейне выдержки, получена следующая расчетная формула:

$$Q(t) = \int_0^b W(\tau) d\tau \\ = ac\rho \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} R_{n,m,k}(t) \left[a_n(1 + \cos n\pi) \frac{1 - \cos m\pi}{a_m} \cdot \frac{1 - \cos k\pi}{a_k} + \right. \\ \left. + a_m(1 + \cos m\pi) \frac{1 - \cos n\pi}{a_n} \cdot \frac{1 - \cos k\pi}{a_k} + a_k(1 + \cos k\pi) \frac{1 - \cos n\pi}{a_n} \cdot \frac{1 - \cos m\pi}{a_m} \right] \quad (16)$$

$$R_{n,m,k}(t) = \left[U_0 - U^* - \frac{W_0}{c\rho(a\lambda_{n,m,k}^2 - \gamma)} \right] \frac{1 - e^{a\lambda_{n,m,k}^2 t}}{a\lambda_{n,m,k}^2} - \frac{W_0}{c\rho(a\lambda_{n,m,k}^2 - \gamma)} \cdot \frac{1 - e^{-\gamma t}}{\gamma} \quad (17)$$

Результаты и обсуждение

Первичные результаты расчетов приведены на рисунке 2, где представлено изменение мощности ТВС в зависимости от времени хранения.

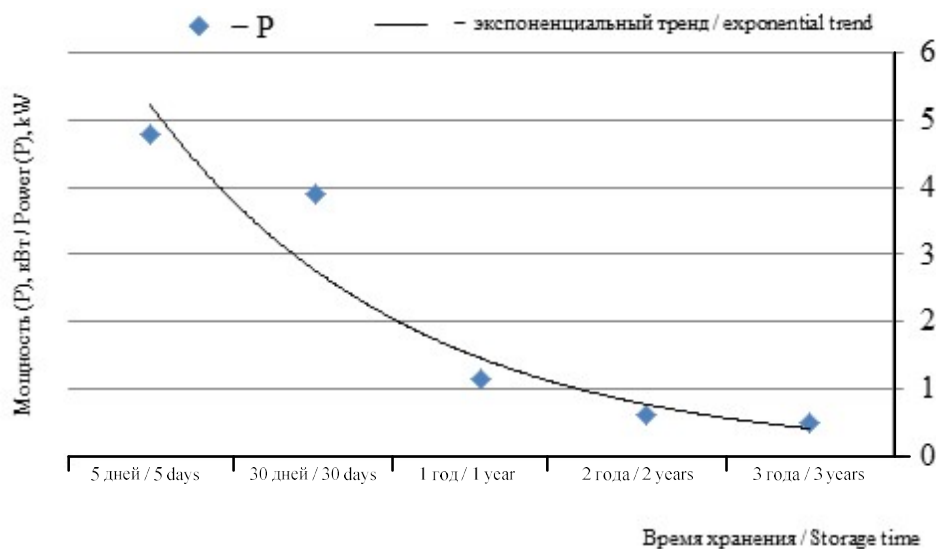


Рис. 2. Зависимость мощности тепловыделяющих сборок от времени их хранения /
Fig. 2. Dependence of the power of fuel assemblies on their storage time

В результате обработки данных установлена зависимость изменения мощности тепловыделяющих сборок от времени хранения, имеющая экспоненциальный вид ($R^2 = 0,93$):

$$W = 9,8915 \times e^{-0,64t} \quad (18)$$

Представленная зависимость тепловыделяющих сборок была получена путем статистической обработки данных (методом наименьших квадратов), подтверждающих состояние активной зоны при работе реактора в нормальном режиме.

Из анализа зависимости (6) следует, что падение мощности наиболее активно происходит на временном отрезке от 30 суток до года. Из этого следует, что первоочередная загрузка хранилища бассейна ОЯТ сборками с наименьшей активностью позволит более активному топливу в кассетах уменьшить выделение тепла в пределах БВ-4. За счет этого возможно управлять формированием дозовых нагрузок на рабочий персонал станции.

Уровень остаточного тепловыделения приведен на рисунке 3. Из анализа кривой, представленной на рисунке 2, следует, что уровень максимального остаточного тепловыделения возникает в случае ускоренной выгрузки. Это происходит во время останова блоков №2–4 с полной выгрузкой блока №1 и не превышает 30%. Принимая среднюю мощность ТВС равной 200 кВт, указанный пик уровня остаточных тепловыделений не превысит 60 кВт, что ниже допустимого значения в 100 кВт согласно «Техническому обоснованию безопасности атомных станций...». В реальных условиях, при заполнении БВ-4 процесс имеет большую длительность, соответственно уровень максимальных остаточных тепловыделений будет ниже представленного на графиках.

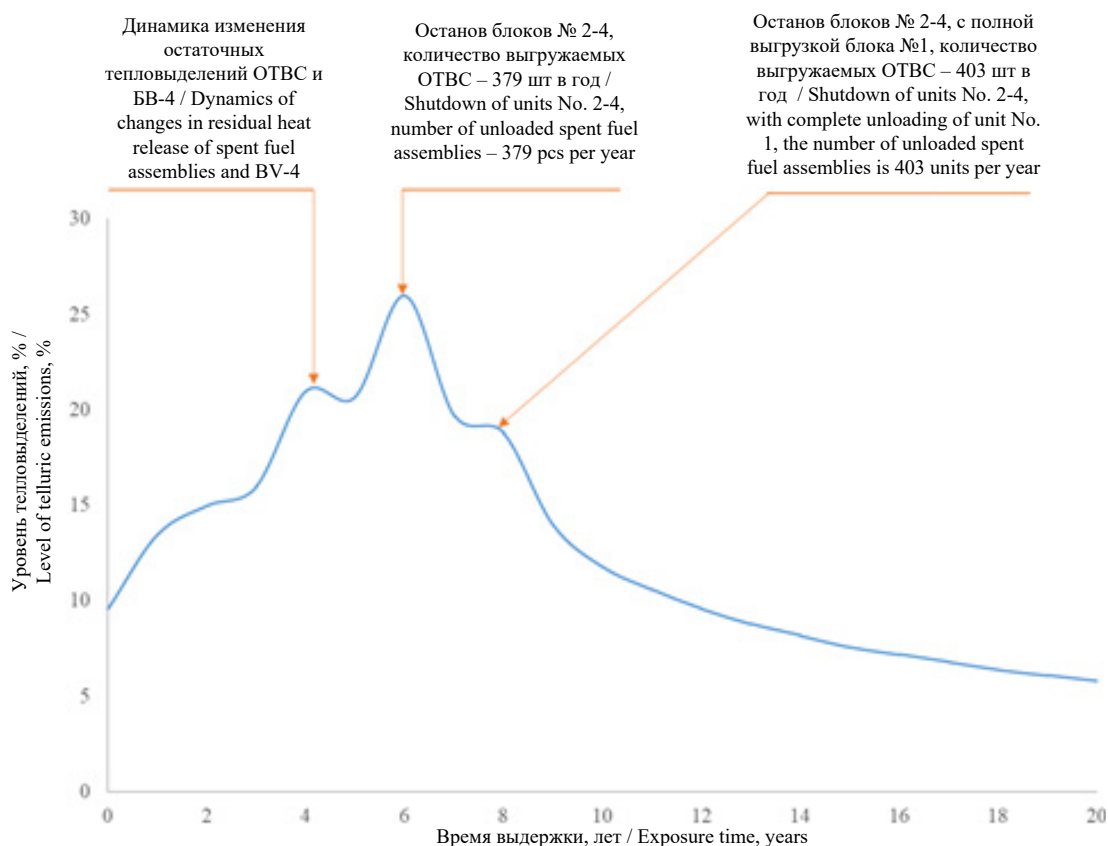


Рис. 3. Динамика остаточных тепловыделений отработанных ТВС и БВ-4 /

Fig. 3. Dynamics of residual heat releases from spent fuel assemblies and spent fuel assemblies

Первый предлагаемый вариант подразумевает, что в БВ-4 находится только ОЯТ, выгрузка не производится, а хранение происходит в нижнем ярусе БВ-4 (уровень

воды 6,5 м). Количество кассет в нижнем ярусе: 320 е.д., мощность одной такой кассеты 1,5 кВт. При расчете всех параметров был получен результат (рис. 4): время полного разогрева воды в БВ-4: 22 часа, время выпаривания всей воды из БВ-4: 96 часов.

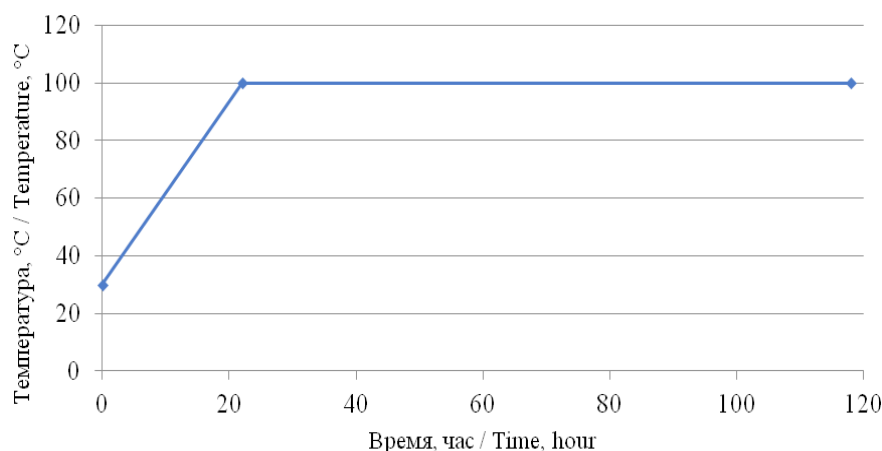


Рис. 4. Полученные результаты для первого яруса хранения /

Fig. 4. The results obtained for the first tier of storage

Второй предлагаемый вариант подразумевает, что все находящееся топливо Библибинской АЭС находится в БВ-4, в нижнем и верхнем ярусах БВ-4, при помощи уплотненного способа хранения ТВС. Изначально заполняется нижний ярус, а затем верхний (уровень воды в БВ-4 равен 9,5 м). Результаты расчетов приведены на рисунке 5. Общее количество кассет 650. Мощность кассеты 4,8 кВт, время разогрева 4,7 часов, время выпаривания всей воды из БВ-4 27 часов.

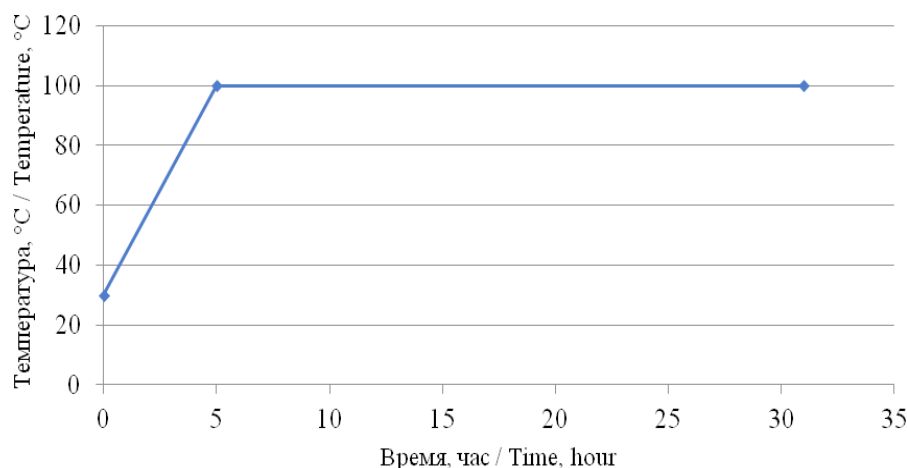


Рис. 5. Полученные результаты для верхнего и нижнего ярусов хранения /

Fig. 5. The results obtained for the upper and lower tiers of storage

Рассмотрим также сценарий, где рассчитывается тепловой режим БВ-4 при уплотненном хранении тепловыделяющих сборок при прекращении принудительного охлаждения. Данный расчет показывает, что при полностью заполненном водой БВ-4 вода все также нагревается до состояния кипения. Это происходит так как, несмотря на естественную циркуляцию, при достаточно плотном нахождении сборок, доля тепла переносится теплопроводностью.

При отсутствии принудительного охлаждения (рис. 6) разогрев воды в БВ-4 до температуры 90°C происходит за 90500 секунд, а до температуры кипения нагрев происходит за 126400 секунд.

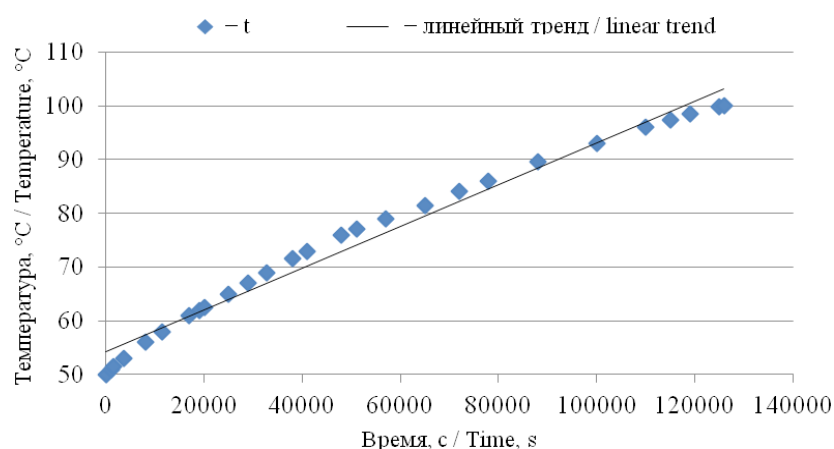


Рис. 6. Изменение температуры тепловыделяющих сборок в БВ-4 при отсутствии принудительного охлаждения и полной загрузке водой /

Fig. 6. Change in the temperature of fuel assemblies in BV-4 in absence of forced cooling and full loading with water

В результате обработки данных установлена зависимость изменения температуры тепловыделяющих сборок (при отсутствии принудительного охлаждения) от времени хранения, имеющая линейный вид ($R^2 = 0,98$):

$$T = 0,0004t + 54,239. \quad (19)$$

На последнем этапе производился расчет для условий, когда оголение тепловыделяющих сборок находилось на уровне 20, 25, а также 50 % (рис. 7). В результате обработки данных установлена зависимость изменения температуры ТВС в БВ-4 от времени хранения при трех неблагоприятных сценариях работы, имеющая линейный вид (табл. 1).

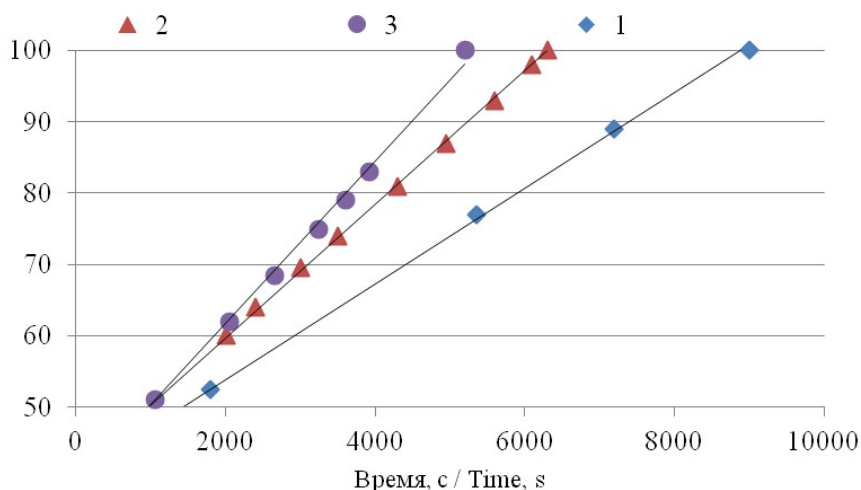


Рис. 7. Изменения температуры ТВС в БВ-4 при условиях:

1) снижение уровня воды до головок тепловыделяющих сборок; 2) оголение тепловыделяющих сборок на 25%; 3) оголение тепловыделяющих сборок на 50% /

Fig. 7. Changes in the fuel assembly temperature in BV-4 with:

1) a decrease in the water level to the heads of the fuel assemblies; 2) exposure of fuel assemblies by 25%; 3) exposure of fuel assemblies by 50%

Таблица 1 / Table 1

**Изменение температуры ТВС в БВ-4 в зависимости от времени хранения /
Changes in fuel assembly temperature in BV-4 with storage time**

Вариант / Variant	Формула / Equation	Коэффициент детерминации R^2 / Coefficient of determination R^2
1	$y = 0,0067x + 40,399$	0,9995
2	$y = 0,0094x + 40,864$	0,9994
3	$y = 0,0114x + 38,936$	0,9971

Изменение температуры ТВС в БВ-4 в зависимости от времени хранения установлено при трех неблагоприятных сценариях работы: 1) снижение уровня воды до головок тепловыделяющих сборок, 2) оголение тепловыделяющих сборок на 25%, 3) оголение тепловыделяющих сборок на 50%.

Расчеты были произведены с целью возможности определения «предельного» состояния в БВ-4 при отсутствии принудительного охлаждения, т.е. рассматривались или прогрев воды до точки кипения, или разогрев тепловыделяющих сборок до температуры 650 (°C).

При оголении сборок ТВС на 20% их температура не достигает критического значения в 650 (°C). Но при других параметрах, т.е. при 25, 50 % данный показатель растет и превышает необходимое критическое значение. Температура самой воды в данных расчетах равна температуре кипения (т.е. 100°C), прогрев происходит за 7,5 часов.

Выводы

1. Поставлена и решена начально-краевая задача математической физики, моделирующая температурно-тепловые процессы в тепловыделяющей сборке, погруженной в бассейн выдержки с принудительным охлаждением.

2. В результате решения поставленной начально-краевой задачи получены расчетные формулы:

- для распределения нестационарного температурного поля в сборке;
- для мощности (дж/с) теплового потока, текущего от сборки к охлаждающей воде в бассейне выдержки;
- для нестационарного теплового потока (дж) текущего от сборки к охлаждающей воде.

3. Аналогичным путем можно поставить и решить начально-краевую задачу, моделирующую температурно-тепловые процессы в тепловыделяющей сборке при частичном погружении сборки в бассейн выдержки с принудительным охлаждением.

4. В системе хранения и обращения с ОЯТ управление всеми механизмами производится вручную. В системе человек-машина возможны ошибки персонала независимо от уровня квалификации, подготовки и опыта. Под ошибочными действиями персонала при управлении комплексом оборудования по транспортированию ОЯТ следует считать ошибку при выборе переключателя управления. Вероятность такого события составляет около 3×10^{-3} .

5. В результате исследования установлено, что у персонала станции будет порядка 60 минут для восстановления полной работоспособности охлаждающих си-

стем БВ-4 при 50-процентном оголении ТВС и отсутствии принудительного охлаждения. Установлено, что в период полного разогрева воды в БВ-4 при отсутствии принудительного охлаждения и при уплотненном хранении сборок ТВС на двух ярусах БВ-4, оболочки нагреваются за 2,5 часа (при оголении сборок на 20%) и за 1 час 20 минут (при оголении сборок на 50%).

Литература

1. Бедретдинов М.М., Степанов О.Е. Валидация кодов КОРСАР/ГП и СОКРАТ/В1 для условий потери охлаждения бассейна выдержки отработанного ядерного топлива. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2021. – Вып. 3. – С. 213–225. DOI: 10.55176/2414-1038-2021-3-213-226.
2. Бригада В.С., Дмитрак Ю.В., Габараев О.З., Голик В.И. Использование разгрузочного бурения для обеспечения безопасности обработки газоносных угольных пластов Донбасса. // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 3. – С. 7–11. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-3-7-11.
3. Голик В.И., Бурдзиева О.Г. К концепции разработки месторождений Садонского рудного пояса. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014.
4. Жердев Г.М., Суворов А.П. Программа «Ядерный Калькулятор ЭГП-6» для инженерных расчётов радиационных характеристик ОТВС Билибинской АЭС. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2020. – Вып. 3. – С. 72–79. DOI: 10.55176/24141038-2020-3-72-79.
5. Заалишвили В.Б., Бурдзиева О.Г., Закс Т.В., Кануков А.С. Информационный мониторинг распределённых физических полей в пределах урбанизированной территории. // Геология и геофизика Юга России. – 2013. – № 4. – С. 8–16.
6. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Дзеранов Б.В., Кануков А.С., Габараев А.Ф., Шепелев В.Д. Сход каменно-ледовой лавины в районе ледника Девдорак 17 мая 2014 года по инструментальным данным. // Геология и геофизика Юга России. – 2014. – № 4. – С. 122–128.
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. Клюев Р.В., Моргоева А.Д., Гаврина О.А., Босиков И.И., Моргоев И.Д. Прогнозирование планового потребления электроэнергии для объединенной энергосистемы с помощью машинного обучения. // Записки Горного института. – 2023. – Т. 261. – С. 392–402.
9. Колпаков Г.Н., Селиваникова О.В. Конструкция твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов. Томск: Изд. Томского политехнического университета, 2009. – 118 с.
10. Краснов М.А., Киселев А.И., Макаренко Г.И., Шикин Е.В., Заляпин В.И. Вся высшая математика. Т. 4. М.: УРСС, 2004. – 192 с.
11. Моргоева А.Д., Моргоев И.Д., Клюев Р.В., Гаврина О.А. Прогнозирование потребления электрической энергии промышленным предприятием с помощью методов машинного обучения. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. № 7. – С. 115–125. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3527.
12. Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И. Теоретические положения автоматизации проектирования селективных водозаборных устройств. // Вычислительные технологии. – 2016. – Т. 21. № 4. – С. 99–110.
13. 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.
14. Сергеев В.В. Особенности расчетного моделирования тепловых режимов бассейнов выдержки БиАЭС. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2021. – Вып. –1. – С. 91–107. DOI: 10.55176/2414-1038-2021-1-97-107.

15. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 15.0. 2013, – 220 p.
16. Brigida V., Golik V.I., Voitovich E.V., Kukartsev V.V., Gozbenko V.E., Konyukhov V.Y., Oparina T.A. Technogenic reservoirs resources of mine methane when implementing the circular waste management concept. // *Resources*. – 2024. – Vol. 13. Issue 2. – Art. No. 33. DOI: 10.3390/resources13020033.
17. Brigida V.S., Golik V.I., Dzeranov B.V. Modeling of coalmine methane flows to estimate the spacing of primary roof breaks. // *Mining*. – 2022. – Vol. 2. – pp. 809–821. DOI: 10.3390/mining2040045.
18. Chierici A., Ciolini R., Siqueira Nascimento D., d’Errico F. An autonomous IoT monitoring unit for radiological and nuclear emergency management. // *European Physical Journal Plus*. – 2025. – Vol. 14 (1). – Art. No. 8. DOI: 10.1140/epjp/s13360-024-05936-z.
19. Gauld I.C., Murphy B.D. Technical basis for a proposed expansion of regulatory guide 3.54-decay heat generation in an independent spent fuel storage installation. Oak Ridge: United States Nuclear Regulatory Commission. 2010, – 230 p.
20. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Brigida V.S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings. // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2020. – Vol. 5. – pp. 47–54. DOI: 10.33271/NVNGU/2020-5/047.
21. Karami Fath I., Niknejad A., Zare-Zardini H. Design optimization of pangolin inspired composites for enhanced energy absorption. // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15(1). – Art. No. 4443. DOI: 10.1038/s41598-025-88474-7.
22. Kile R.F., Epiney A.S., Brown N.R. RELAP5-3D validation studies based on the High Temperature Test facility. // *Nuclear Engineering and Design*. – 2024. – Vol. 426. – Art. No. 113401. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2024.113401.
23. Klyuev R.V., Morgoev I.D., Morgoeva A.D., Gavrina O.A., Martyushev N.V., Efremkov E.A., Mengxu Q. Methods of forecasting electric energy consumption: A literature review. // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – Art. No. 8919. DOI: 10.3390/en15238919.
24. Malyukova L.S., Martyushev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V., Konyukhov V.Y., Bashmur K.A., Panfilova T.A. Circular mining wastes management for sustainable production of camellia sinensis (L.) O. Kuntze. // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15. – Art. No. 11671. DOI: 10.3390/su151511671.
25. Morrison S.L., Parks G.T. The effect of Am241 on UK plutonium recycle options in thorium-plutonium fuelled LWRs – Part II: BWRs. // *Annals of Nuclear Energy*. – 2020. – Vol. 135. – Art. No. 106974. DOI: 10.1016/j.anucene.2019.106974.

References

1. Bedretdinov M.M., Stepanov O.E. Validation of codes KORSAR/GP and SOKRAT/V1 for conditions of loss of cooling of the spent nuclear fuel pool. VANT. Serija: Jaderno-reaktornye konstanty. 2021. Issue 3. pp. 213–225. DOI: 10.55176/2414-1038-2021-3-213-226. (In Russ)
2. Brigida V.S., Dmitrak Yu.V., Gabaraev O.Z., Golik V.I. Use of destressing drilling to ensure safety of Donbass gas-bearing coal seams extraction. Occupational Safety in Industry. 2019. No. 3. pp. 7–11. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-3-7-11. (In Russ)
3. Golik V.I., Burdzieva O.G. Geophysical monitoring of Sadon field development technology. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014. (In Russ)
4. Zherdev G.M., Suvorov A.P. The program “Nuclear Calculator EGP-6” for engineering calculations of the radiation characteristics of spent fuel assemblies of the Bilibino NPP. VANT. Serija: Jaderno-reaktornye konstanty. 2020. Issue 3. pp. 72–79. DOI: 10.55176/24141038-2020-3-72-79. (In Russ)
5. Zaalshvili V.B., Burdzeva O.G., Zaks T.V., Kanukov A.S. Information monitoring of distributed physical fields within an urbanized territory. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2013. No. 4. pp. 8–16. (In Russ)

6. Zaalshvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Kanukov A.S., Gabaraev A.F., Shepelev V.D. A rock-ice avalanche in the area of the Devdorak glacier on 17 May 2014 according to instrumental data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2014. No. 4. pp. 122–128. (In Russ)
7. Zaalshvili 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. Klyuev R.V., Morgoeva A.D., Gavrina O.A., Bosikov I.I., Morgoev I.D. Forecasting planned electricity consumption for the united power system using machine learning. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 261. pp. 392–402. (In Russ)
9. Kolpakov G.N., Selivanikova O.V. Design of fuel rods, channels and cores of power reactors. Tomsk. Tomsk Polytechnic University Publishing House. 2009. 118 p. (In Russ)
10. Krasnov M.A., Kiselev A.I., Makarenko G.I., Shikin E.V., Zalyapin V.I. All higher mathematics. Vol. 4. Moscow. URSS. 2004. 192 p. (In Russ)
11. Morgoeva A.D., Morgoev I.D., Klyuev R.V., Gavrina O.A. Forecasting of electric energy consumption by an industrial enterprise using machine learning methods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022. Vol. 333. No. 7. pp. 115–125. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3527. (In Russ)
12. Muzaev I.D., Kharebov K.S., Muzaev N.I. Theoretical principles of automation of design of selective water intake devices. *Computing technologies*. 2016. Vol. 21. No. 4. pp. 99–110. (In Russ)
13. 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)
14. Sergeev V.V. Features of computational modeling of thermal regimes of BiNPP cooling pools. *VANT. Serija: Jaderno-reaktornye konstanty*. 2021. Issue 3. pp. 91–107. DOI: 10.55176/2414-1038-2021-1-97-107. (In Russ)
15. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 15.0. 2013. 220 p.
16. Brigida V., Golik V.I., Voitovich E.V., Kukartsev V.V., Gozbenko V.E., Konyukhov V.Y., Oparina T.A. Technogenic reservoirs resources of mine methane when implementing the circular waste management concept. *Resources*. 2024. Vol. 13. Issue 2. Art. No. 33. DOI: 10.3390/resources13020033.
17. Brigida V.S., Golik V.I., Dzeranov B.V. Modeling of coalmine methane flows to estimate the spacing of primary roof breaks. *Mining*. 2022. Vol. 2. pp. 809–821. DOI: 10.3390/mining2040045.
18. Chierici A., Ciolini R., Siqueira Nascimento D., d’Errico F. An autonomous IoT monitoring unit for radiological and nuclear emergency management. *European Physical Journal Plus*. 2025. Vol. 14 (1). Art. No. 8. DOI: 10.1140/epjp/s13360-024-05936-z.
19. Gauld I.C., Murphy B.D. Technical basis for a proposed expansion of regulatory guide 3.54-decay heat generation in an independent spent fuel storage installation. Oak Ridge. United States Nuclear Regulatory Commission. 2010. 230 p.
20. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Brigida V.S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. Vol. 5. pp. 47–54. DOI: 10.33271/NVNGU/2020-5/047.
21. Karami Fath I., Niknejad A., Zare-Zardini H. Design optimization of pangolin inspired composites for enhanced energy absorption. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15(1). Art. No. 4443. DOI: 10.1038/s41598-025-88474-7.
22. Kile R.F., Epiney A.S., Brown N.R. RELAP5-3D validation studies based on the High Temperature Test facility. *Nuclear Engineering and Design*. 2024. Vol. 426. Art. No. 113401. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2024.113401.
23. Klyuev R.V., Morgoev I.D., Morgoeva A.D., Gavrina O.A., Martyushev N.V., Efremenkova E.A., Mengxu Q. Methods of forecasting electric energy consumption: A literature review. *Energies*. 2022. Vol. 15. Art. No. 8919. DOI: 10.3390/en15238919.

24. Malyukova L.S., Martyushev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V., Konyukhov V.Y., Bashmur K.A., Panfilova T.A. Circular mining wastes management for sustainable production of camellia sinensis (L.) O. Kuntze. Sustainability. 2023. Vol. 15. Art. No. 11671. DOI: 10.3390/su151511671.

25. Morrison S.L., Parks G.T. The effect of Am241 on UK plutonium recycle options in thorium-plutonium fuelled LWRs – Part II: BWRs. Annals of Nuclear Energy. 2020. Vol. 135. Art. No. 106974. DOI: 10.1016/j.anucene.2019.106974.

УДК 551.435.6(470.64)

DOI: 10.46698/VNC.2025.27.78.017

Оригинальная статья

Моделирование овражной эрозии методом сглаженной многоуровневой оценки

Н.А. Корецкий¹, А.С. Горбунов¹, В.Н. Бевз¹, В.А. Караваев²¹ Воронежский государственный университет, Россия, 394018, г. Воронеж,
Университетская площадь, 1, e-mail: gorbunov.ol@mail.ru;² Институт географии РАН, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 29,
e-mail: vadimka_ig@mail.ru

Статья поступила: 23.12.2024, доработана: 10.02.2025, принята к публикации: 14.02.2025

Резюме: Актуальность работы. Овражная эрозия один из основных негативных экзогенных процессов в лесостепной зоне Русской равнины. В условиях интенсификации сельского хозяйства требуется постоянное слежение и прогнозирование ее развития. В статье авторы пытаются показать подход к моделированию эрозии методом сглаженной многоуровневой оценки восприимчивости территории. **Цель исследования** заключается в разработке нового метода оценки развития овражной эрозии на основе машинного обучения. Предлагаемая технология дает более точные результаты по оценке восприимчивости территории к овражной эрозии, по сравнению с рядом классических подходов. Безусловным ее преимуществом является возможность применения для анализа крупных территорий с высокой неравномерностью распределения оврагов. **Методы исследования.** Ключевыми исследовательскими методами выступали: моделирование на основе машинного обучения и геоинформационное моделирование. В разработке широко использован один из наиболее современных методов машинного обучения CatBoost, положенный в основу разрабатываемого подхода. Главная его особенность – это объединение нескольких моделей, решающих разные задачи, в одну более сильную. **Результаты исследования.** Проиллюстрирована реализация метода сглаженной многоуровневой оценки восприимчивости территории к овражной эрозии на примере лесостепи Калачской возвышенности (Воробьевский район, Воронежской области). Рассматриваются сходства и различия предлагаемого подхода с уже существующими методами. Обосновываются две новые метрики для оценки точности работы предлагаемого метода – RF1 и NDF, приводятся соответствующие формулы. Вводятся понятия внешнего, внутреннего и регуляризационного уровней моделирования, а также иллюстрируется практический смысл использования каждого из них для решения поставленной задачи. Обосновывается использование подхода сглаженной многоуровневой оценки восприимчивости территории к овражной эрозии с учетом блока специальных геоморфологических факторов и производных от них на базе цифровой модели рельефа FABDEM v1-2. Предложенная технология показала высокую точность описания овражной эрозии (0.95) и может быть применена для анализа других территорий.

Ключевые слова: овражная эрозия, моделирование овражной эрозии, CatBoost, ансамблевый подход, геоинформационные системы, машинное обучение, восприимчивость территории к эрозии.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20122, <https://rscf.ru/project/24-27-20122/>.

Для цитирования: Корецкий Н.А., Горбунов А.С., Бевз В.Н., Караваев В.А. Моделирование овражной эрозии методом сглаженной многоуровневой оценки. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 208-217. DOI: 10.46698/VNC.2025.27.78.017

DOI: 10.46698/VNC.2025.27.78.017

Original paper

Modeling of gully erosion by the method of smoothed multilevel estimation

N.A. Koretsky¹, A.S. Gorbunov¹, V.N. Bezv¹, V.A. Karavaev²¹ Voronezh State University, 1 Universitetskaya Pl., Voronezh 394018, Russian Federation, e-mail: gorbunov.ol@mail.ru;² Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 29 Staromonetnii Lane, Moscow 119017, Russian Federation, e-mail: vadimka_ig@mail.ru

Received: 23.12.2024, revised: 10.02.2025, accepted: 14.02.2025

Abstract: Relevance. Gully erosion is one of the main negative exogenous processes in the forest-steppe zone of the Russian Plain. In the conditions of agricultural intensification, constant monitoring and forecasting of its development is required. In the article the authors try to show an approach to modeling erosion by the method of smoothed multilevel estimation of territory susceptibility. **The aim** of the study is to develop a new method for estimating gully erosion development based on machine learning. The proposed technology gives more accurate results on the assessment of the territory susceptibility to gully erosion, compared to a number of classical approaches. Its undoubted advantage is the possibility of application for analyzing large territories with high unevenness of gully distribution. **Methods.** The key research methods were: modeling based on machine learning and geoinformation modeling. One of the most modern methods of machine learning CatBoost, which is the basis of the developed approach, was widely used in the development. Its main feature is combining several models solving different problems into one stronger one. **Results.** The realization of the method of smoothed multilevel estimation of territory susceptibility to gully erosion is illustrated on the example of forest-steppe of Kalachskaya upland (Vorobyevsky district, Voronezh region). Similarities and differences of the proposed approach with already existing methods are considered. Two new metrics for evaluating the accuracy of the proposed method - RF1 (modified random forest) and NDF - are justified, and the corresponding formulas are given. The concepts of external, internal and regularization levels of modeling are introduced, and the practical sense of using each of them to solve the problem is illustrated. The use of the approach of smooth multilevel estimation of territory susceptibility to gully erosion taking into account a block of special geomorphological factors and derivatives of them on the basis of digital elevation model FABDEM v1-2 is substantiated. The proposed technology showed high accuracy of gully erosion description (0.95) and can be applied to analyze other territories.

Keywords: gully erosion, gully erosion modeling, CatBoost, ensemble approach, geographic information systems, machine learning, susceptibility of the territory to erosion.

Acknowledgments: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-27-20122, <https://rscf.ru/project/24-27-20122/>.

For Citation: Koretsky N.A., Gorbunov A.S., Bezv V.N., Karavaev V.A. Modeling of gully erosion by the method of smoothed multilevel estimation. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 208-217. DOI: 10.46698/VNC.2025.27.78.017

Введение

Моделирование экзогенных процессов [Заалишвили и др., 2021; Заалишвили и др., 2022; Стогний и др., 2022] и, в частности, овражной эрозии с использованием алгоритмов машинного обучения в последние десятилетия активно внедряется в научные исследования [Бабешко и др., 2021; Викторov, 2022; Исаева, Шамбетов, 2022; Кан, Зеркаль, 2018; Махинов, 2020; Михайлов, 2010; Черноморец, Михайлов,

2012]. Оно призвано помочь в решении актуальной задачи – борьбе с деградацией земель вызванной процессами линейной эрозии [Ганиева, Метхийев, 2015; Wang et al., 2023]. Интеграция алгоритмов машинного обучения, таких как метод опорных векторов (SVM), случайный лес (RF), экстремальный градиентный бустинг (XG Boost) и искусственные нейронные сети на основе многослойного персептрона (ANN, MLP), усовершенствовала предсказание восприимчивости территории к овражной эрозии. Анализируя факторы развития эрозии, эти модели не только повышают предсказательную точность, но и информируют о стратегиях управления земельными ресурсами, направленных на снижение рисков [Arabameri et al., 2020; Fan et al., 2024; Igwe et al., 2020]. Ключевые факторы, влияющие на развитие овражной эрозии, такие как морфометрия рельефа, литология горных пород, почвенный покров, характер использования земель оцениваются с помощью тщательного сбора и анализа данных, что приводит к более надежному картированию восприимчивости территории к овражной эрозии. В зарубежной литературе это направление получило название Gully Erosion Susceptibility (GES) (англ. «восприимчивость к овражной эрозии») [Gelete et al., 2024; Saha et al., 2022; Breiman, 2001].

Несмотря на существующие достижения в применении машинного обучения для оценки восприимчивости территории к овражной эрозии, в мировом научном сообществе до сих пор отсутствует единое мнение по поводу ее эффективности. Это связано с частым недостатком данных для обучения моделей и необходимостью создания новых моделей для разных физико-географических условий [Fan et al., 2024].

Настоящая работа нацелена на демонстрацию нового подхода для прогнозирования овражной эрозии – сглаженной многоуровневой оценки восприимчивости к ней территории. Он отличается от существующих тем, что использует не одну, а несколько моделей для обучения (ансамбль) и применяет трехуровневый подход к оценке достоверности полученных результатов. Для оценки точности работы ансамбля моделей были разработаны новые метрики – RF1 и NDF.

В качестве объекта исследования была выбрана сильно заовраженная территория Воробьевского района Воронежской области, расположенная в пределах южной лесостепи Калачской возвышенности (рис. 1). В неотектонической структуре ей соответствуют Калачское поднятие, и примыкающий к нему на западе Павловско-Мамонский прогиб. Поднятие в свою очередь осложнено локальными структурами 4-го и более высоких порядков. В частности, на формирование оврагов района в значительной степени оказывает влияние локальное Воробьевское неотектоническое поднятие. В геологическом строении территории принимают участие верхнемеловые отложения туронского и сантонского ярусов (мел, мергель мощностью до 50 м), перекрытые довольно мощной толщей (до 40 м) верхнепалеогеновых, неогеновых и четвертичных песчано-глинистых отложений. Мело-мергельные породы и палеогеновые пестроцветные глины обнажаются по склонам долинно-балочной сети, создавая оригинальную двухярусную структуру склоновых ландшафтов. Территория исследования расположена полностью в границах Донского оледенения. Она представляет собой возвышенную (220–240 м) пологоволнистую эрозионно-денудационную равнину, которая перекрыта глинисто-суглинистой мореной Донского возраста (мощность до 10 м) и субэразальными лессовидными суглинками среднего верхнего звена неоплейстоцена (мощность 5–7 м). Особенностью территории является наличие широких асимметричных долин рек, крутые правобережья

которых густо изрезаны овражной сетью. Глубина эрозионного расчленения составляет 80–120 м, густота овражной сети на некоторых участках достигает 5 км на км². Интенсивное развитие овражной эрозии началось в конце XIX века и связано с активной распашкой склоновых земель. В настоящее время наблюдается появление новых эрозионных форм рельефа, а также рост уже существующих оврагов.

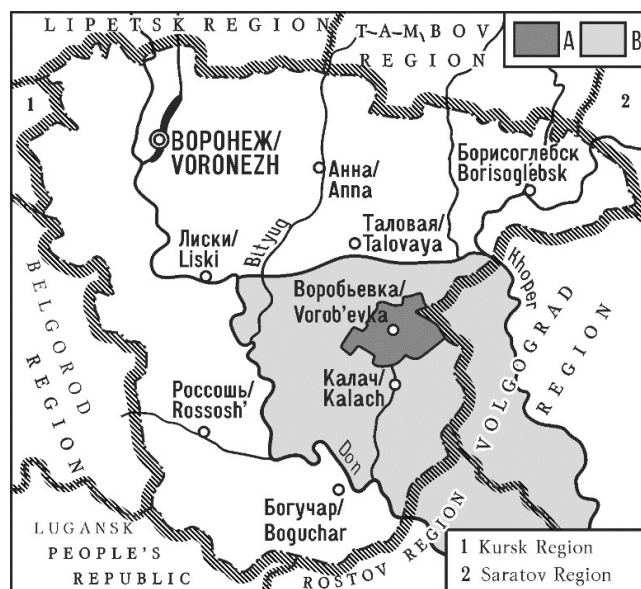


Рис. 1. Географическое положение территории исследования: А – Воробьевский муниципальный район; В – Калачская возвышенность /

Fig. 1. Geographical location of the study area: А – Vorobyevsky Municipal District; В – Kalachskaya Upland

Методы исследования

Исходными данными для исследования выступали космические снимки высокого разрешения, реализованные через сервис Яндекс. Спутник и цифровая модель рельефа FABDEM v1-2, разрешением 30 м. По космическим снимкам были выделены овражные формы рельефа протяженностью более 70 м. Они классифицировались на склоновые, приводораздельные и донные. Для дальнейшего анализа использовались склоновые и приводораздельные овраги. Цифровая модель рельефа использовалась для получения морфометрических показателей.

Обучение моделей и расчеты производились на языке программирования Python с подключенными библиотеками: pandas (2.1.1), numpy (1.24.3), sklearn (1.3.0), catboost (1.2.7), xgboost (1.7.3), lighgbm (4.5.0), optuna (4.1.0), imblearn (0.11.0). Дополнительно использовалась библиотека rasterio (1.3.6) для работы с растровыми изображениями. Векторизация оврагов производилась в программе QGIS 3.34.3, обработка модели рельефа – в SAGA GIS 9.5.1.

Результаты исследования

На первом этапе работ была построена географическая база данных, содержащая значения морфометрических величин (факторов) и информацию о наличии оврага в пределах ячейки растра размером 30 на 30 м. В качестве рассматриваемых факторов были использованы: абсолютная высота местности, крутизна, экспозиция, топографический индекс нагрева поверхности, длина линии стока, водосбор-

ная площадь, превышение над базисом эрозии, LS-фактор, топографический индекс влажности, Гауссова, горизонтальная, вертикальная, избыточная, разностная и аккумуляционная кривизны [Флоринский, 1993; Шарый, 2016].

На втором этапе происходил выбор алгоритма построения модели и обучение ее на базе данных. В качестве исходных моделей машинного обучения были апробированы 7 алгоритмов, основывающихся на технологии решающих деревьев: CatBoost, XGBoost, LightGBM, AdaBoost, HistGradientBoost, Random Forest, Extra Trees. Наиболее высокие результаты из них показал алгоритм CatBoost, представляющий собой ансамбль, состоящий из нескольких независимых моделей. В настоящей работе под ансамблем понимается группа однородных моделей с различной архитектурой (разными гиперпараметрами), обученных с помощью предлагаемой технологии по индивидуальной усеченной сбалансированной выборке. Преимуществами CatBoost по сравнению с другими алгоритмами является то, что он строит симметричные деревья решений, ускоряющие работу и повышающие качество результатов, а также использует случайные операции в обучении, что делает модель устойчивее и препятствует ее переобучению. В данном исследовании использовался ансамбль, построенный из 10 базовых моделей CatBoost (рис. 2).

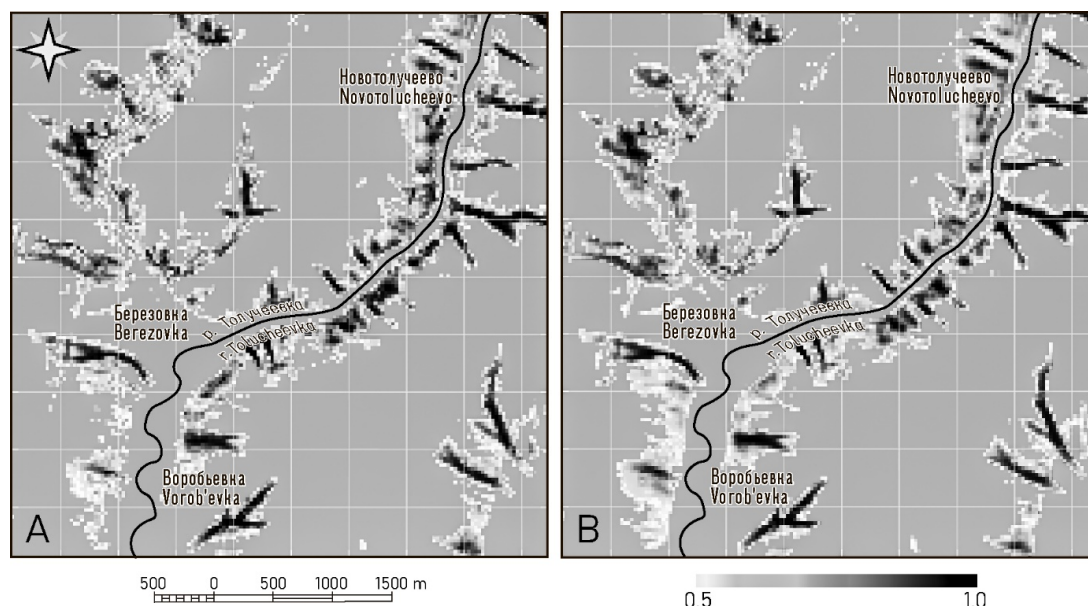


Рис. 2. Восприимчивость территории Воробьевского района к овражной эрозии (фрагмент карты): А – рассчитанная одиночной моделью Catboost;

В – рассчитанная ансамблем из 10 моделей Catboost /

Fig. 2. Susceptibility of the territory of Vorob'yovskiy district to gully erosion (map fragment):
A – calculated by a single Catboost model; B – calculated by an ensemble of 10 Catboost models

Результатом работы алгоритма являлась бинарная классификация ячеек раstra с вероятностью появления в каждой из них оврага. Эта вероятность всегда имеет вид $u \in [0, 1]$, где 0 – максимальная вероятность отсутствия оврага, а 1 – максимальная вероятность наличия оврага. Для дальнейшего анализа выбирались только те ячейки, в которых вероятность появления оврага была выше 50 %. Она интерпретируется как степень восприимчивости территории к овражной эрозии.

Реализация предлагаемого подхода оценки восприимчивости территории к овражной эрозии подразумевает проведение трёхуровневого моделирования.

Первый (внешний) уровень – это оценка восприимчивости к овражной эрозии для всей территории исследования. На этом уровне для обучения каждой модели ансамбля случайным образом отбирается 50% ячеек, имеющих метку «овраг» и такое же количество ячеек в которых оврагов нет. Подход, при котором обучающая выборка делится на два равных класса, называется балансировкой. Он используется для территорий с явным перевесом ячеек какого-либо класса.

На этапе обучения каждый член ансамбля моделей CatBoost проходил индивидуальную гиперпараметрическую оптимизацию на основе байесовского метода Tree-structured Parzen Estimator (TPE). Он автоматически подбирает оптимальные значения настроек моделей (количество деревьев, скорость обучения, регуляризацию и др.), исключая ручной выбор параметров.

Оптимизация моделей проводилась методом градиентного спуска с использованием логарифмической функции потерь, позволяющей оценить не только точность, но и уверенность в принятых решениях. Оценка логарифмических потерь проходила трехкратную перекрестную проверку.

Для оценки общей точности работы ансамбля моделей CatBoost использовались специально разработанные метрики – RF1 (объединение известных в программировании метрик точности recall и F1-score, формула 1) и NDF (Normalized Difference False, соотношение ложноположительных и ложноотрицательных срабатываний ансамбля моделей, формула 2).

$$RF1 = \frac{2 * recall_{ans} * f1_{avg}}{recall_{ans} + f1_{avg}} \quad (1)$$

$$NDF = 0,5 * \left(1 + \frac{FP_{ans} - FN_{ans}}{FP_{ans} + FN_{ans}} \right) \quad (2)$$

где $recall_{ans}$ – полнота выделения оврагов. Отношение правильно выделенных оврагов, к суммарному количеству оврагов на исследуемой территории (в том числе не выделенных). $f1_{avg}$ – оценка неправильно выделенных и не выделенных оврагов на исследуемой территории; FP_{ans} – количество ложноположительных срабатываний ансамбля моделей; FN_{ans} – количество ложноотрицательных срабатываний ансамбля моделей.

Как показало исследование, применение ансамблевого подхода улучшило общую точность моделей CatBoost внешнего уровня. Точность по метрике RF1 составила 0,926, по метрике NDF 0,917.

После завершения процесса обучения базовых моделей и формирования ансамбля, через алгоритм пропусклся полный набор данных и формировалась модель вероятности появления овражной эрозии первого уровня. Ведущими факторами на этом уровне моделирования оказались абсолютная высота местности, Гауссова кривизна и LS-фактор.

Второй (внутренний) уровень – это оценка восприимчивости к овражной эрозии только тех территорий (набора ячеек раstra), в которых вероятность появления оврага превосходит 50%. Общая схема работы алгоритма аналогична первому уровню. Его практическая значимость заключается в том, что он позволяет минимизировать выраженное влияние факторов развития эрозии, полученных на первом уровне и определить новые. Проведенное моделирование показало, что ведущими факторами развития эрозии на втором уровне моделирования являются относитель-

ные превышения над базисом эрозии, водосборная площадь и экспозиция. Также следует отметить, что результаты внутреннего моделирования всегда являются менее точными по сравнению с моделированием внешнего уровня и должны использоваться не в качестве самостоятельного результата, а в роли дополняющих данных к результатам внешнего моделирования. Результат оценки точности моделирования на втором уровне по метрике RF1 составил 0.719, по метрике NDF 0.772.

Третий (регуляризирующий) уровень – это корректировка значений результатов моделирования первого уровня на основе результатов второго. Для расчета используются показатели точности предсказаний, полученные на предыдущих уровнях моделирования. Корректировка результатов производилась по формуле 3:

$$W = \frac{\omega_1 x_1 + \omega_2 x_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (3)$$

где x_1 – результаты оценки восприимчивости территории к овражной эрозии по данным первого уровня моделирования; x_2 – результаты оценки восприимчивости территории к овражной эрозии по данным второго уровня моделирования; ω_1 – точность моделирования на первом уровне; ω_2 – точность моделирования на втором уровне.

Проведенные расчеты показали, что площади территорий с высокой восприимчивостью к овражной эрозии в пределах Воробьевского района Воронежской области составляют 2852 га, при этом существующее в настоящий момент овражное расчленение с помощью предложенного подхода объясняется с вероятностью 95%.

Выводы

Применение метода многоуровневой оценки восприимчивости территории к овражной эрозии способно качественно улучшить прогнозирование развития эрозийных процессов, что достигается за счёт:

- использования ансамблевого подхода с обучением на индивидуальной усеченной сбалансированной выборке;
- расчёта специальных метрик качества (RF1 для оценки качества работы ансамбля в целом и NDF для оценки производительности ансамбля);
- выполнения моделирования на трех уровнях: внешнем – для оценки вероятности развития эрозии на всей территории; внутреннем – для оценки вероятности развития эрозии с учётом минимизации влияния глобальных факторов; регуляризационном – для получения более строгой оценки восприимчивости территории к овражной эрозии.

Предлагаемый подход апробирован для территории Воробьевского района Воронежской области и показал высокую точность описания существующей на данный момент овражной эрозии (95 %), а также высокие расчётные точности ансамблей внешнего и внутреннего уровней.

Все это в совокупности позволяет говорить о достоверности предсказанных моделью результатов.

Литература

1. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Зарецкая М.В., Снетков Д.А., Хрипков Д.А., Евдокимов В.С. О новых подходах к проблеме прогноза возникновения оползня. // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2021. – Т. 18. № 3. – С. 15–22. DOI: 10.31429/vestnik-18-3-15-22.

2. Викторов А.С. Моделирование морфологических особенностей абразионных берегов с развитием оползневых процессов в криолитозоне. // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2022. – № 6. – С. 28–36.
3. Ганиева С.А., Мехтиев Д.Т. Вопросы моделирования смещений из-за оползней, возникающих при землетрясениях. // Геодезия и картография. – 2015. – № 9. – С. 27–31.
4. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Габараев А.Ф., Мерзликин Т.И. Нелинейные колебания грунтовой толщи по инструментальным и численным данным. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 4. – С. 70–82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006.
5. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Габараев А.Ф., Мерзликин Т.И., Фидарова. Нелинейные эффекты в геологических объектах по данным математического моделирования. // Материалы VIII Международной конференции «Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии». Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН, 2022. – С. 329–336.
6. Исаева Г.С., Шамбетов З.С. Моделирование движения оползней методом гидродинамики сглаженных частиц. // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2022. – Т. 9. № 1. – С. 27–32.
7. Кан К., Зеркаль О.В. Оценка устойчивости сейсмогенного оползня на основе трёхмерного моделирования при землетрясении. // Научный альманах. – 2018. – № 9-2(47). – С. 119–122.
8. Махинов А.Н. Крупный оползень и вызванное им цунами в Бурейском водохранилище. // Геоморфология. – 2020. – № 3. – С. 31–43. DOI: 10.31857/S0435428120030086.
9. Михайлов В.О. Математическое моделирование катастрофических селей, обвалов и оползней. // Наука и современность. – 2010. – № 2-1. – С. 72–78.
10. Стогний В.В., Заалишвили В.Б., Пономарёва Н.Л. Современная геодинамика и сейсмичность Северного Кавказа: проблемы мониторинга. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 2. – С. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003.
11. Флоринский И.В. Анализ цифровых моделей высот для выделения линейных структур земной поверхности. Автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.24.02 / Флоринский Игорь Васильевич. – М.: МГУ, 1993. – 17 с.
12. Черноморец С.С., Михайлов В.О. Численное моделирование катастрофических селей, обвалов и оползней с применением трёхмерной дискретной модели. // ГеоРиск. – 2012. – № 1. – С. 16–27.
13. Шарый П.А. Геоморфологический анализ пространственной изменчивости почв и экосистем. Автореф. дисс. д-ра биол. наук: 03.02.08 / Шарый Петр Александрович. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2016. – 49 с.
14. Arabameri A., Chen W., Loche M., Zhao X., Li Y., Lombardo L., Cerda A., Pradhan B., Bui D.T. Comparison of machine learning models for gully erosion susceptibility mapping. // Geoscience Frontiers. – 2020. – No. 11. – pp. 1609–1620. DOI: 10.1016/j.gsf.2019.11.009.
15. Breiman L. Random Forests. // Machine Learning. – 2001. – No. 45. – pp. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
16. Fan F., Gu X., Luo J., Zhang B., Liu H., Yang H. et al. Identification of gully erosion activity and its influencing factors: A case study of the Sunshui River Basin. // PLoS ONE. – 2024. – No. 19. – pp. 1609–1620. DOI: 10.1371/journal.pone.0309672.
17. Gelete T. B., Pasala P., Abay N.G., Weldu G., Yasin K.H., Kebede E., Abdula I.A. Integrated machine learning and geospatial analysis enhanced gully erosion susceptibility modeling in the Erer watershed in Eastern Ethiopia. // Environmental Informatics and Remote Sensing. – 2024. – No. 12. – pp. 1–20. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1410741.
18. Igwe O., John U.I., Solomon O. et al. GIS-based gully erosion susceptibility modeling, adapting bivariate statistical method and AHP approach in Gombe town and environs Northeast Nigeria. // Geoenviron Disasters. – 2020. – No. 7. DOI: 10.1186/s40677-020-00166-8.
19. Saha S., Roy J., Arabameri A., Blaschke T., Bui D.T. Machine learning-based gully erosion

susceptibility mapping: A case study of Eastern India. // *Sensors*. – 2020. – No. 20. – pp. 1313. DOI: 10.1313.10.3390/s20051313.

20. Wang Y., Zhang Y., Chen H. Gully erosion susceptibility prediction in Mollisols using machine learning models. // *Journal of Soil and Water Conservation*. – 2023. – No. 78. – pp. 385–396. DOI: 10.2489/jswc.2023.00019.

References

1. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Zaretskaya M.V., Snetkov D.A., Khripkov D.A., Evdokimov V.S. On new approaches to the problem of predicting landslide occurrence. *Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation*. 2021. Vol. 18. No. 3. pp. 15–22. DOI: 10.31429/vestnik-18-3-15-22. (In Russ.)
2. Viktorov A.S. Modeling of morphological features of abrasion banks with the development of landslide processes in the cryolithozone. *Geocology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*. 2022. No. 6. pp. 28–36. (In Russ.)
3. Ganieva S.A., Mekhtiev D.T. Modeling of displacements due to landslides occurring during earthquakes. *Geodesy and Cartography*. 2015. No. 9. pp. 27–31. (In Russ.)
4. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Gabaraev A.F., Merzlikin T.I. Nonlinear vibrations of the soil layer according to instrumental and numerical data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 70–82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006. (In Russ.)
5. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Gabaraev A.F., Merzlikin T.I., Fidarova M.I. Nonlinear effects in geological objects according to mathematical modeling data. In: *Proceedings of International Scientific Conference Hazardous natural and man-made processes in mountainous regions: models, systems, technologies*. Vladikavkaz. GPI VSC RAS. 2022. pp. 329–336. (In Russ.)
6. Isaeva G.S., Shambetov Z.S. Modeling of landslide movement by the smoothed particle hydrodynamics method. *Fundamental and Applied Issues of Mining Sciences*. 2022. Vol. 9. No. 1. pp. 27–32. (In Russ.)
7. Kan K., Zerkal O.V. Assessment of seismogenic landslide stability based on three-dimensional modeling during an earthquake. *Scientific almanac*. 2018. No. 9-2 (47). pp. 119–122. (In Russ.)
8. Makhinov A.N. Large landslide and tsunami caused by it in the Bureya reservoir. *Geomorphology*. 2020. No. 3. pp. 31–43. DOI: 10.31857/S0435428120030086. (In Russ.)
9. Mikhailov V.O. Mathematical modeling of catastrophic mudflows, rockfalls and landslides. *Science and Modernity*. 2010. No. 2-1. pp. 72–78. (In Russ.)
10. Stogniy V.V., Zaalishvili V.B., Ponomareva N.L. Modern geodynamics and seismicity of the North Caucasus: monitoring problems. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003. (In Russ.)
11. Florinsky I.V. Analysis of digital elevation models for identifying linear structures of the Earth's surface. The abstract of the dissertation of Cand. Tech. Sci. Moscow. MSU. 1993. 17 p. (In Russ.)
12. Chernomorets S.S., Mikhailov V.O. Numerical modeling of catastrophic mudflows, rockfalls and landslides using a three-dimensional discrete model. *GeoRisk*. 2012. No. 1. pp. 16–27. (In Russ.)
13. Shary P.A. Geomorphological analysis of spatial variability of soils and ecosystems. The abstract of the dissertation of Dr. Biology Sci. Rostov-on-Don. SFU. 2016. 49 p. (In Russ.)
14. Arabameri A., Chen W., Loche M., Zhao X., Li Y., Lombardo L., Cerda A., Pradhan B., Bui D.T. Comparison of machine learning models for gully erosion susceptibility mapping. *Geoscience Frontiers*. 2020. No. 11. pp. 1609–1620. DOI: 10.1016/j.gsf.2019.11.009.
15. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*. 2001. No. 45. pp. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
16. Fan F., Gu X., Luo J., Zhang B., Liu H., Yang H. et al. Identification of gully erosion activity and its influencing factors: A case study of the Sunshui River Basin. *PLoS ONE*. 2024. No. 19. pp. 1609–1620. DOI: 10.1371/journal.pone.0309672.

17. Gelete T. B., Pasala P., Abay N.G., Weldu G., Yasin K.H., Kebede E., Abdula I.A. Integrated machine learning and geospatial analysis enhanced gully erosion susceptibility modeling in the Erer watershed in Eastern Ethiopia. *Environmental Informatics and Remote Sensing*. 2024. No. 12. pp. 1–20. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1410741.

18. Igwe O., John U.I., Solomon O. et al. GIS-based gully erosion susceptibility modeling, adapting bivariate statistical method and AHP approach in Gombe town and environs Northeast Nigeria. *Geoenviron Disasters*. 2020. No. 7. DOI: 10.1186/s40677-020-00166-8.

19. Saha S., Roy J., Arabameri A., Blaschke T., Bui D.T. Machine learning-based gully erosion susceptibility mapping: A case study of Eastern India. *Sensors*. 2020. No. 20. pp. 1313. DOI: 20.1313.10.3390/s20051313.

20. Wang Y., Zhang Y., Chen H. Gully erosion susceptibility prediction in Mollisols using machine learning models. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2023. No. 78. pp. 385–396. DOI: 10.2489/jswc.2023.00019.

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 $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, const , $\sin$, $\cos$, $\min$, $\max$, etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements (H_2O) and measurement units (MW/cm^2) and must be of the straight (ordinary) type. One shouldn't mix similar written letters of the Latin, Greek and Russian alphabets and should use the proper macros. The letters I and J, v and ν , e and l, h and n, q and g, V and U, O (letter) and 0 (zero) must differ in inscribing. There must be a sign of the continuous gap between a value figure meaning and its dimension. The hyphen is not used; the gap character also mustn't be used in the text for the lay-out. The formulas are designed with the help of the built-in formulas processor (Microsoft Equation), the enumeration being done in the round brackets (2), aligned along the right edge; the decoding of all signs (letters) in the formulas is given in the order of the formula reference. To avoid the errors and misunderstandings, the editorial staff recommends the authors to use the Latin, Greek and other (not Russian) alphabet letters in the formulas and to keep to the omission sizes while the formulas printing. Large formulas must be divided into separate fragments. If possible, the fragments must be independent; each line is a separate object. The enumeration and punctuation marks should be put into an ordinary text separately from the formulas. The tables, pictures and photos are placed inside the text and must have a through numeration along the text 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
(№ 1. 2025 г. Том 15)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 18.03.2025 г. Дата фактического выхода 28.03.2025 г.

Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.

Гарнитура «Times». Усл. печ. лист 26,2.

Тираж 100 экз. Заказ № 21.

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