

ISSN 2221-3198

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 1 / 2026



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 16
№ 1 / 2026**

Владикавказ 2026

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

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

академик РАН **В. А. Бабешко**, Кубанский государственный университет, г. Краснодар

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

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

Республиканский Центр сейсмологической службы при НАНА, Азербайджан

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ответственный секретарь

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

Выпускающий редактор

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

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

Журнал включен в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus

Журнал издается с 2011 года.

Периодичность издания – 4 номера в год

Учредитель:

ВНЦ РАН

Адрес учредителя:

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

Тел.: 8(8672)726788

e-mail: info@vncran.ru

http://vncran.ru

Издатель:

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук

Адрес издателя и редакции:

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

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

e-mail: southgeo@mail.ru

http://geosouth.ru

ISSN 2221-3198

e-ISSN 2686-7486

Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 29119

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

© Геофизический институт ВНЦ РАН, 2026

Фото на обложке – Весна наступила (К.С. Хареев)

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

Editor in Chief

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

Deputy Editor in Chief

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

Members of Editorial board

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Executive Secretary

Dmitry A. Melkov, Cand. Sci. (Tech.), Geophysical
Institute of Vladikavkaz Scientific Centre of RAS,
Vladikavkaz, Russian Federation

Managing Editor

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

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

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

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

Founder:

Vladikavkaz Scientific Centre of RAS

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

Publisher:

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

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

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

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

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

© Geophysical Institute VSC RAS, 2026

Cover photo – Spring has Arrived (K.S. Kharebov)

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ	
Наставко Е.В., Лешуков Т.В., Змеев Б.Ю., Федосюк Г.А.	
Фтор-глиноземистый титанит (гротит) из гранитов турочакского комплекса (Горный Алтай).....	8
ГЕОФИЗИКА	
Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я., Бондарь М.Н.	
Особенности сейсмического режима западного и восточного сегментов Крымско-Черноморского региона....	20
Назаретян С.Н., Арутюнян Р.А., Игитян Г.А., Казарян А.А.	
Особенности структуры и динамики развития афтершоковой зоны Спитакского землетрясения 1988 г. (за период 1988–2024 гг.)	33
Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э.	
Общие свойства и особенности очаговых параметров землетрясений юго-запада Черноморской впадины	44
Сидякин П.А., Барышников А.А., Першин И.М., Микляев П.С.	
Моделирование плотности потока радона в зависимости от температуры и влажности воздуха (на примере аномальной зоны горы Бештау)	57
Шестаков А.Ф., Тягунов Д.С.	
Изучение сигналов электромагнитного излучения при разрушении образцов известняка в процессе их одноосного нагружения.....	69
Chellamuthu S.N., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P.	
The role of hydrology in hillslope monitoring and landslide risk mitigation	80
Minarto E., Ditaningrum A., Kristianto	
Hypocenter distribution of volcanic earthquakes beneath Mount Sinabung (Oct 2023–Apr 2024) using an adaptive damping Geiger relocation	93
Yetirmishli G.J., Kazimova S.E.	
Study of the activity dynamics of the Otman-Bozdag mud volcano	109
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ	
Abbasov E.Y., Hasanov A.B., Veliyev G.O., Axundov Z.C.	
Detailed geological and tectonic study of the Khara-Zira structure and surrounding territories of South Caspian Basin based on seismic-velocity models	121
ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ	
Парада С.Г.	
Геофизические признаки золотоносности рудно-магматических систем Северной Осетии (Алании).....	134
ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	
Бондарева Л.И., Абукова Л.А.	
Геофлюидодинамические особенности нефтегазоаккумуляции глубокопогруженных горизонтов юга Бузулукской впадины	142
Рамазанов А.Ш., Давлетшин Ф.Ф., Исламов Д.Ф., Акчурин Р.З.	
Определение параметров зоны нарушения фильтрационных свойств пласта по данным термогидродинамических исследований	154

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Алборов И.Д., Бурдзиева О.Г., Кануков А.С., Архиреева И.Г., Дадтеева Э.В.

- Подвижность тяжелых металлов в почвах агроландшафтов: факторы, оценка и экологические последствия на примере Садонского свинцово-цинкового комбината 168

Заалишвили В.Б., Тимченко В.Ю.

- Многолетние тренды температуры и осадков в горных и предгорных районах Северного Кавказа (на примере Северной Осетии) 180

Клюев Р.В.

- Геоэкологическая оценка воздействия золотоизвлекательных фабрик на компоненты природной среды 189

Мячина К.В., Керимов И.А.

- Пространственно-временной анализ геоэкологического состояния атмосферы Чеченской Республики на основе спутниковых данных 204

Ревазов М.О., Мельков Д.А., Бурдзиева О.Г., Архиреева И.Г.

- Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние горных территорий (Кармадонское ущелье) 217

Тебиева Д.И., Доброносков В.В.

- Аридные ландшафты – специфический элемент высотно-поясной структуры восточной части Центрального Кавказа 228

ГЕОИНФОРМАТИКА

Погорелов А.В., Липилин Д.А., Кузьякина М.В.

- Многолетняя динамика гидрографических характеристик и наземного покрова в речных бассейнах Азово-Кубанской равнины 240

CONTENTS

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

Nastavko E.V., Leshukov T.V., Zmeev B.Yu., Fedosyuk G.A.

Fluorine-aluminous titanite (grothite) from granites of the Turochak complex (Altai Mountains)8

GEOPHYSICS

Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya., Bondar M.N.

Features of the seismic regime in the western and eastern segments of the Crimean-Black Sea region20

Nazaretyan S.N., Haroutiunian R.A., Igityan H.A., Kazarian A.A.

Features of the structure and development dynamics of the aftershock zone of the 1988 Spitak earthquake
(for the period 1988–2024)33

Pustovitenko B.G., Eredzhepov E.E.

General properties and features of earthquake source parameters in the southwestern part of the Black Sea Basin44

Sidyakin P.A., Baryshnikov A.A., Pershin I.M., Miklyaev P.S.

Modeling of radon flux density depending on air temperature and humidity (case study
of the anomalous zone of Mount Beshtau)57

Shestakov A.F., Tyagunov D.S.

Research of electromagnetic emission signals during the destruction of limestone samples under
uniaxial loading69

Chellamuthu S.N., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P.

The role of hydrology in hillslope monitoring and landslide risk mitigation80

Minarto E., Ditaningrum A., Kristianto

Hypocenter distribution of volcanic earthquakes beneath Mount Sinabung (Oct 2023–Apr 2024) using
an adaptive damping Geiger relocation93

Yetirmishli G.J., Kazimova S.E.

Study of the activity dynamics of the Otman-Bozdag mud volcano109

GEOPHYSICAL METHODS

Abbasov E.Y., Hasanov A.B., Veliyev G.O., Axundov Z.C.

Detailed geological and tectonic study of the Khara-Zira structure and surrounding territories
of South Caspian Basin based on seismic-velocity models121

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY

Parada S.G.

Geophysical signs of gold-bearing ore-magmatic systems of North Ossetia (Alania)134

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF OIL AND GAS FIELDS

Bondareva L.I., Abukova L.A.

Geo-fluidodynamic features of hydrocarbon accumulation in deep-seated horizons of the southern part
of the Buzuluk Basin142

Ramazanov A.Sh., Davletshin F.F., Islamov D.F., Akchurin R.Z.

- Determination of parameters of the zone of impaired reservoir permeability based on thermal hydrodynamic studies154

GEOECOLOGY

Alborov I.D., Burdzieva O.G., Kanukov A.S., Arkhireeva I.G., Dadteeva E.V.

- Mobility of heavy metals in agricultural landscape soils: factors, assessment, and environmental consequences using the Sadon lead-zinc plant as a case study168

Zaalishvili V.B., Timchenko V.Yu.

- Long-term trends in temperature and precipitation in the mountainous and foothill regions of the North Caucasus (case study of the North Ossetia)180

Klyuev R.V.

- Geoecological assessment of the impact of gold extraction plants on the components of the natural environment189

Myachina K.V., Kerimov I.A.

- Spatial and temporal analysis of the geoecological state of the Chechen Republic atmosphere based on satellite data204

Revazov M.O., Melkov D.A., Burdzieva O.G., Arkhireeva I.G.

- Influence of geodynamic processes on the geoecological state of mountain areas (Karmadon gorge).....217

Tebieva D.I., Dobronosov V.V.

- Arid landscapes are a specific element of the high-belt structure of the eastern part of the Central Caucasus.....228

GEOINFORMATICS

Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Kuzyakina M.V.

- Long-term dynamics of hydrographic characteristics and land cover in the river basins of the Azov-Kuban Plain240

УДК 549.655+552.311

DOI: 10.46698/VNC.2026.86.94.001

Оригинальная статья

Фтор-глиноземистый титанит (гротит) из гранитов турочакского комплекса (Горный Алтай)

Е.В. Наставко^{ORCID}, Т.В. Лешуков^{ORCID}, Б.Ю. Змеев^{ORCID}, Г.А. Федосюк^{ORCID}Кемеровский Государственный Университет, Россия, 650000, г. Кемерово,
ул. Красная, 6, e-mail: evnastavko@yandex.ru

Статья поступила: 09.10.2025, доработана: 23.02.2026, принята к публикации: 25.02.2026

Резюме: Актуальность работы. Использование титанита в качестве минерала геохронометра в последнее время приобретает все большую популярность. При этом в гранитоидах встречается как магматический, так и метаморфический титанит. Последний является продуктом низкоградного преобразования биотита. Индикатором генезиса титанита могут служить содержания железа, фтора и глинозема, а также их разнообразные отношения. Наиболее информативными в составе фтор-глиноземистого титанита могут выступать отношения Fe/Al и $(Fe+Al)/F$, указывающие на магматическое или метаморфическое происхождение титанита. **Целью исследования** является изучение химического состава титанита для определения его генезиса в гранитах турочакского комплекса и возможности его последующего использования для геохронологических исследований. **Объектом исследования** являлся титанит из гранитов третьей фазы внедрения турочакского граносиенит-гранит-лейкогранитового комплекса ($\gamma D_1 t$), расположенного в Горно-Алтайском фрагменте Алтае-Минусинского ранне-среднедевонского магматического пояса Алтае-Саянской складчатой области (АССО). **Методы** исследования включали: петрографическое описание пород, изучение состава титанита с последующим выполнением кристаллохимических пересчетов состава титанита зарядным методом и составление формул, а также анализ отношений Fe/Al и $(Fe+Al)/F$ в составе титанита. Химический состав определялся в полированных шлифах на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) *Tescan Vega3* с приставкой рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа *Oxford*. **Результаты исследований.** Установлено, что титанит из гранитов турочакского комплекса является фтор-глиноземистым и имеет следующую формулу $(Ca_{0.97-1.00}Fe_{0.01-0.02})_{\Sigma 0.99-1.01}(Ti_{0.79-0.81}Al_{0.18-0.22})_{\Sigma 0.98-1.01}(Si_{0.98-1.00}Al_{0-0.02})_{\Sigma 1.00}O_4(O_{0.81-0.86}F_{0.14-0.19})_{\Sigma 1.00}$. Отношения в его составе Fe/Al (менее 1:8) и $(Fe+Al)/F$ (близко к 1:1) свидетельствуют о метаморфическом генезисе титанита и, как следствие, невозможности его применения для целей геохронологии гранитов турочакского комплекса.

Ключевые слова: граниты, гротит, геохронометры, титанит, фтор-глиноземистый титанит, турочакский комплекс, Горный Алтай.

Для цитирования: Наставко Е.В., Лешуков Т.В., Змеев Б.Ю., Федосюк Г.А. Фтор-глиноземистый титанит (гротит) из гранитов турочакского комплекса (Горный Алтай). *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 8-19. DOI: 10.46698/VNC.2026.86.94.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.86.94.001

Original paper

Flourine-aluminous titanite (grothite) from granites of the Turochak complex (Altai Mountains)

E.V. Nastavko^{ORCID}, T.V. Leshukov^{ORCID}, B.Yu. Zmeev^{ORCID}, G.A. Fedosyuk^{ORCID}

Kemerovo State University, 6 Krasnaya Str., Kemerovo 650000,
Russian Federation, e-mail: evnastavko@yandex.ru

Received: 09.10.2025, revised: 23.02.2026, accepted: 25.02.2026

Abstract: Relevance. The use of titanite as a geochronometer mineral has recently become increasingly popular. In this case, both magmatic and metamorphic titanite are found in granitoids. The latter is a product of low-grade biotite transformation. The content of iron, fluorine and alumina, as well as their various ratios, can serve as an indicator of titanite genesis. The most informative in the composition of fluorine-aluminous titanite can be the Fe/Al and $(Fe+Al)/F$ ratios indicating the magmatic or metamorphic origin of titanite. **The aim** of the paper is to study the chemical composition of titanite to determine its genesis in the granites of the Turochak complex and the possibility of its subsequent use for geochronological studies. **The object** of the study was titanite from granites of the third phase of the intrusion of the Turochak granosyenite-granite-leucogranite complex ($\gamma D_1 t$) located in the Gorno-Altai fragment of the Altai-Minusinsk early-middle Devonian igneous belt of the Altai-Sayan folded region (ASFR). The research methods included: petrographic description of rocks, study of titanite composition with subsequent crystallochemical recalculations of titanite composition by the charging method and compilation of formulas, as well as analysis of Fe/Al and $(Fe+Al)/F$ ratios in titanite. The chemical composition was determined in polished sections on a Tescan Vega3 scanning electron microscope (SEM) with an Oxford X-ray fluorescence energy-dispersive analysis attachment. **Results.** It was established that titanite from the granites of the Turochak complex is fluorine-alumina and has the following formula $(Ca_{0.97-1.00}Fe_{0.01-0.02})_{\Sigma 0.99-1.01}Ti_{0.79-0.81}Al_{0.18-0.22}\Sigma_{0.98-1.01}(Si_{0.98-1.00}Al_{0-0.02})_{\Sigma 1.00}O_4(O_{0.81-0.86}F_{0.14-0.19})_{\Sigma 1.00}$. The ratios in its composition Fe/Al (less than 1:8) and $(Fe+Al)/F$ (close to 1:1) indicate the metamorphic genesis of titanite and, as a consequence, the impossibility of its use for the purposes of geochronology of the granites of the Turochak complex.

Keywords: granites, grothite, geochronometers, titanite, flourine-aluminous titanite, Turochak complex, Altai Mountains.

For citation: Nastavko E.V., Leshukov T.V., Zmeev B.Yu., Fedosyuk G.A. Fluorine-aluminous titanite (grothite) from granites of the Turochak complex (Altai Mountains). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 8-19. DOI: 10.46698/VNC.2026.86.94.001

Введение

Титанит является распространенным акцессорным минералом многих изверженных и метаморфических пород, который наряду с цирконом, апатитом, рутилом, монацитом и алланитом, дает важные представления о процессах магматизма и метаморфизма [Scibiorski, Cawood, 2022; Van Schijndel et al., 2024]. Особенности его химического состава позволяют использовать его в целях радиоизотопного датирования [Frost et al., 2001], которое приобретает все большую популярность [Балтыбаев и др., 2024; Дорошкевич и др., 2022; Кориш и др., 2024; Скублов и др., 2021; Kasay et al., 2024; Kawohl et al., 2023; Li. et al., 2022; Qiu et al., 2025; Wei et al., 2024], и геотермобарометрии [Erdmann et al., 2019; Hayden et al., 2008].

Фтор-глиноземистый титанит (гротит) имеет следующую формулу (Ca,REE) (Ti,Al,Fe) $SiO_4(O,OH,F)$ и кристаллизуется в широком диапазоне температур и давлений, при этом отмечено, что с ростом давления в нем, так же как и в амфиболе, возрастает содержание алюминия [Markl, Piazzolo, 1999; Tropper et al., 2002]. Изначально считалось, что главным фактором появления гротита в минеральном парагенезисе являются высокие параметры давления в диапазоне 18–22 кбар [Franz, Spear, 1985], поскольку именно высокое давление способствует вхождению алюминия в структуру титанита. Подобный высокоглиноземистый титанит, содержащий одновременно существенные количества фтора и глинозема (Al_2O_3 до 14 мас. %, F до 2,5 мас. %), обнаружен в эклогитах, доломитах и мраморах Австрии [Castelli, Rubatto, 2002; Franz, Spear, 1985]. При этом в последние годы появляется все больше данных о нахождении высокоглиноземистого титанита в породах и рудах средних и низких PT -параметров образования. Где, вероятно, его формирование может определяться другими факторами, такими как состав породы и флюидная фаза [Markl, Piazzolo, 1999]. Так, высокоглиноземистый титанит (Al_2O_3 7,9–12,7 мас. %) описан в рудах золотополиметаллического Березитового месторождения Верхнего Приамурья, которое имеет средние PT -параметры образования. Появление высокоглиноземистого титанита авторы объясняют повышенной активностью фтора минералообразующей среды [Вах и др., 2009]. С повышенной концентрацией фтора в расплаве связывают находку гротита (Al_2O_3 до 8,5 мас. %, F до 2 мас. %) в виде включений в цирконах из гранитоидов кристаллического фундамента Южного Ямала [Ерохин и др., 2019]. Оценка флюидного режима может помочь при определении потенциальной рудоносности гранитов (золото, уран, вольфрам, молибден, медь, цинк, свинец, литий, бериллий и т.д.) Урала [Коновалова и др., 2013], Горного Алтая [Гусев, Коробейников, 2014] и Большого Кавказа [Газеев и др., 2024; Гусев и др., 2023].

Кроме того, описан гротит для пород зеленосланцевой фации метаморфизма. Примерами могут служить титаниты в гранат-слюдистых сланцах шихтинской свиты Срединнокамчатского массива [Тарарин и др., 2011] и сланцев Иртышской зоны смятия Восточного Казахстана [Наставко и др., 2024]. В обоих случаях его формирование происходило в условиях низких давлений и температур зеленосланцевой фации метаморфизма.

F , Al и Fe в составе титанита могут использоваться для определения условий его формирования [Kowallis et al., 2022; Scibiorski, Cawood, 2022]. Так, отношения Fe/Al и $(Fe+Al)/F$ в фтор-глиноземистом титаните может использоваться как индикатор его метаморфического ($Fe/Al < 1:2$, $(Fe+Al)/F$ близко к 1:1 и почти всегда $> 1:2$) или магматического (Fe/Al близко к 1:1 и почти всегда $> 1:2$, $(Fe+Al)/F$ практически всегда $< 1:2$) генезиса.

Цель работы заключается в выяснении природы титанита на основе его химического состава и возможности его применения для геохронологических целей в гранитах турочакского комплекса.

Геологическое строение района исследований

Турочакский граносиенит-гранит-лейкогранитовый комплекс ($\gamma D_1 t$) относится к Горно-Алтайскому, который является редуцированной частью Алтае-Минусинского ранне-среднедевонского магматического пояса и представлен только лохковским циклом в виде гранитоидного магматизма. В целом данный пояс сформирован в условиях активной континентальной окраины кордильерского типа. Территориально массив располагается в Турочакском районе Республики Алтай (рис. 1).

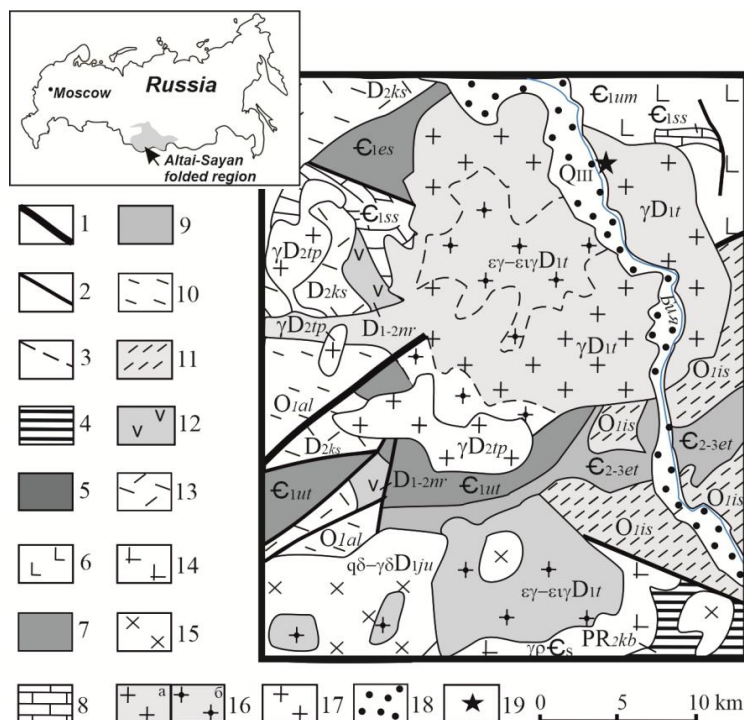


Рис. 1. Схема расположения (А) и строения (Б) турочаского граносиенит-гранит-лейкогранитового комплекса по [Бабин и др., 2007]:

1-3 – разрывные нарушения: 1-2 – достоверные: 1 – главные, 2 – прочие, 3 – предполагаемые; 4 – кебезенский плагиогнейсово-амфиболитовый комплекс (PR_{2kb}); 5 – эсконгинская свита (E_{1es}), 6 – усть-анзасско-манжерокская свита (E_{1um}); 7 – убинско-тырганская группа свит (E_{1ut}); 8 – сийская терригенно-карбонатная свита (E_{1ss}); 9 – еландинско-тандошинская группа свит (E_{2-3et}); 10 – алзасская свита (O_{1al}); 11 – ишпинская свита (O_{1is}); 12 – нырнинская свита (D_{1-2nr}), 13 – кротинско-саганская группа свит (D_{2ks}); 14 – саракокинский диорит-тоналит-плагиогранитовый комплекс (γD_{1t}), 15 – югалинский габбро-диорит-гранодиоритовый комплекс ($q\delta-\gamma\delta D_{1ju}$); 16 – турочакский граносиенит-гранит-лейкогранитовый комплекс (D_{1t}): а – порфировидные биотитовые граниты и лейкограниты, граносиениты, аляскиты, аплитовидные граниты (γD_{1t}), б – порфировидные биотитовые умеренно-щелочные граниты и лейкограниты ($\epsilon\gamma-\epsilon\gamma D_{1t}$); 17 – топольнинский диорит-гранодиоритовый комплекс (γD_{2tp}); 18 – озерно-аллювиальные четвертичные отложения (Q_{III}); 19 – место отбора проб /

Fig. 1. Scheme of the location (A) and structure (B) of the Turoch granosyenite-granite-leucogranite complex according to [Babin et al., 2007]:

1-3 – faults: 1-2 – reliable, 1 – main, 2 – other; 3 – inferred; 4 – Kebezen plagioisss-amphibolite complex (PR_{2kb}); 5 – Eskonginskaya suite (E_{1es}), 6 – Ust-Anzas-Manzherok suite (E_{1um}); 7 – Uba-Tyrgan group of suites (E_{1ut}); 8 – Siyskaya terrigenous-carbonate suite (E_{1ss}); 9 – Elandinsko-Tandoshinskaya group of suites (E_{2-3et}); 10 – Alzas suite (O_{1al}); 11 – Ishpinskaya suite (O_{1is}); 12 – Nyrninskaya suite (D_{1-2nr}), 13 – Krotinsko-Saganskaya group of suites (D_{2ks}); 14 – Sarakokshinsky diorite-tonalite-plagiogranite complex (γD_{1t}), 15 – Yugalinsky gabbro-diorite-granodiorite complex ($q\delta-\gamma\delta D_{1ju}$); 16 – Turochaksky granosyenite-granite-leucogranite complex (D_{1t}): a – porphyritic biotite granites and leucogranites, granosyenites, alaskites, aplite-like granites (γD_{1t}), b – porphyritic biotite moderately alkaline granites and leucogranites ($\epsilon\gamma-\epsilon\gamma D_{1t}$); 17 – Topolninsky diorite-granodiorite complex (γD_{2tp}); 18 – lacustrine-alluvial Quaternary deposits (Q_{III}); 19 – sampling site

Турочакский массив имеет трехфазное зональное строение. Центральная часть массива сложена породами первых двух фаз внедрения (суммарно 10 %), которые представлены меланогранитами и умереннощелочными гранитами. Меланограниты состоят из кислого плагиоклаза альбит-олигоклазового состава (30–50 %), калиевого полевого шпата (20–40 %), кварца (15–30 %), амфибола (10–15 %) и биотита (до

5 %). В умереннощелочных гранитах, по сравнению с меланогранитами, возрастает доля калиевого полевого шпата (30–60 %), при близком количестве плагиоклаза (30–50 %) и кварца (25–30 %), из темноцветных минералов присутствует только биотит (до 5 %).

Периферические части массива сложены третьей фазой внедрения (до 90 %), состоящей из неравнозернистых, порфировидных и аплитовидных биотитовых, биотит-мусковитовых лейкогранитов, умеренно щелочных лейкогранитов и аляски-тов. Лейкограниты состоят из кварца (30–35 %), плагиоклаза (25–35 %), калиевого полевого шпата (35–40 %), биотита (до 10 %) и мусковита (до 5 %). В аляски-тах количество кварца достигает 40–50 %. Для пород данной фазы характерно обилие аксессуаров: магнетит, ильменит, пиррофанит и манганоильменит, титанит, апатит и циркон, гранат, монацит, а также минералы группы эпидота – алланит-(Ce) и эпидот.

Датировка комплекса, полученная $U-Pb$ методом по цирконам из порфировидных биотитовых гранитов Турочакского массива горы Большой Иконостас (390 ± 6 млн лет) и умеренно-щелочных гранитов горы Цаган (400 ± 4 млн лет), принята как раннедевонская [Бабин и др., 2007].

Материалы и методы исследований

Отбор 9 проб осуществлен на расстояниях от 35 до 75 метров из коренных выходов горы Большой Иконостас, Республика Алтай. Одна проба получена из скального выхода у подножия горы на уровне уреза воды р. Бия. Все пробы отнесены к гранитам третьей фазы внедрения турочакского комплекса. Для всех проб было выполнено петрографическое описание и кристаллохимический пересчет состава минералов зарядным методом по методике, разработанной в работе [Oberti et al., 1991]. Далее был проведен анализ отношений Fe/Al и $(Fe+Al)/F$ в составе титанита и построены диаграммы для выяснения его генезиса.

Титанит обнаружен во всех 10 образцах и приурочен исключительно к лейстам хлоритизированного биотита. Зерна идиоморфные, максимальный размер составляет 0,25 мм. Суммарно в 10 образцах гранитов проанализирован состав 86 зерен титанита.

Химический состав установлен с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) *Tescan Vega3* с приставкой рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа *Oxford*. Ускоряющее напряжение для СЭМ съемки и анализа полированных шлифов гранитов составило 20 кВ.

Краткая петрографическая характеристика пород

Граниты основной третьей фазы внедрения турочакского граносиенит-гранит-лейкогранитового комплекса макроскопически представляют собой лейкократовые породы со светло-розовым до розового окрасом. Часто граниты покрыты черными пленками окислов и гидроокислов марганца. Породы макроскопически имеют среднезернистую, реже крупнозернистую, порфировидную, гипидиоморфнозернистую структуру и массивную текстуру. Под микроскопом устанавливается типичная гранитная, местами микропегматитовая структура. Для калиевого полевого шпата характерна микроклиновидная решетка, что позволяет отнести его к микроклину. Зерна кварца ксеноморфные, заполняют интерстиции.

Минеральный состав достаточно устойчив и представлен на 35–40 % калиевым полевым шпатом, 25–30 % плагиоклазом альбитового состава ($An_{0.3}$) и 25–30 % кварцем. Содержание биотита достигает 10 %, а мусковита не превышает 1 %. Акцессорные минералы представлены апатитом, цирконом, минералами группы эпидота (алланит-Ce с каймой из редкоземельного эпидота и эпидот) и группы ильменита

(пирофанит и манганоильменит), а также титанитом. Наблюдаются слабовыраженные вторичные изменения в виде хлоритизации биотита и незначительной соссюритизации плагиоклаза.

Титанит обнаружен во всех 10 образцах и приурочен исключительно к лейстам хлоритизированного биотита. Зерна титанита идиоморфные без зональности размером от 0,05 мм (рис. 2) до 0,20 мм. Суммарно в 10 образцах гранитов проанализирован состав 86 зерен титанита.

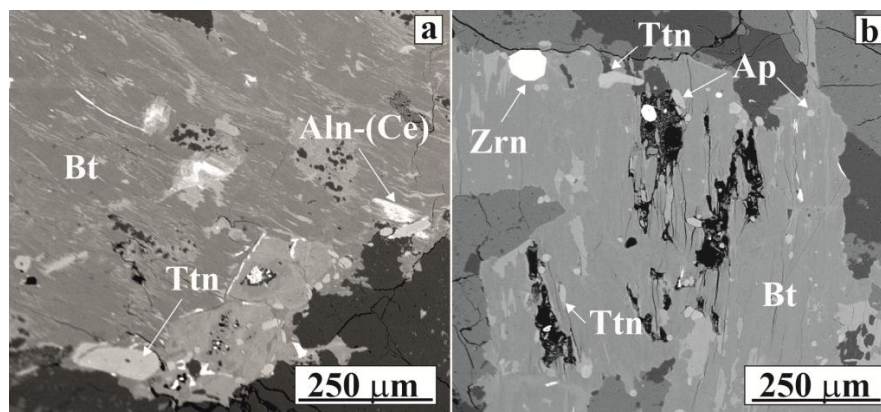


Рис. 2. Зерна титанита приуроченные к лейстам биотита. Условные обозначения приняты по [Warr, 2021]: Aln-(Ce) – цериевый алланит, Ap – апатит, Bt – биотит, Ttn – титанит, Zrn – циркон /

Fig. 2. Titanite grains confined to biotite laths. The designations are adopted according to [Warr, 2021]: Aln-(Ce) – cerium allanite, Ap – apatite, Bt – biotite, Ttn – titanite, Zrn – zircon

Результаты работ и их обсуждение

Сводный химический состав гротита по 86 определениям приведен в таблице 1. Содержание глинозема варьирует от 4,78 до 6,20 мас. %, фтора от 1,49 до 2,03 мас. %. Также для титанита характерно постоянное наличие железа в следующих количествах 0,39–0,75 мас. %.

Таблица 1 / Table 1

Вариации химического состава гротита (мас. %) /
Chemical composition of grothite (wt. %)

Элементы/ Elements	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO
мин – макс ср. знач min – max avg	30.38 – 30.99 30.71	32.13 – 33.38 32.96	4.78 – 6.20 5.37	0.39 – 0.75 0.58	28.01 – 28.99 28.66

В связи с большим количеством определений химического состава минерала, в таблице 2 для наглядности приводятся по одному составу формуле для каждого образца.

С учетом всех 86 определений химического состава общая формула титанита имеет следующий вид – $(Ca_{0.97-1.00}Fe_{0.01-0.02})_{\Sigma 0.99-1.01}Ti_{0.79-0.81}Al_{0.18-0.22})_{\Sigma 0.98-1.01}(Si_{0.98-1.00}Al_{0-0.02})_{\Sigma 1.00}O_4(O_{0.81-0.86}F_{0.14-0.19})_{\Sigma 1.00}$.

Фигуративные точки состава титанита на диаграммах Al–Fe, Al–F, Fe+Al–F и Fe–F [Kowallis et al., 2022] располагаются в поле титанита метаморфических пород (рис. 3). Отношение железа к алюминию в изученном титаните составляет менее 1 к 2 ($Fe/Al < 1:2$), а суммы железа и алюминия к фтору $(Fe+Al)/F$ близко к 1:1 и почти всегда более чем 1:2.

Таблица 2 / Table 2

Химический состав гротита (мас. %) / Chemical composition of grothite (wt. %)

Элементы/ Elements	№ образца/ Sample No									
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
SiO ₂	30.58	30.87	30.99	30.68	30.78	30.41	30.77	30.71	30.65	30.58
TiO ₂	32.74	33.26	33.36	32.87	33.20	32.62	33.08	32.97	32.82	32.71
Al ₂ O ₃	5.68	5.02	4.78	5.39	5.11	6.18	5.21	5.30	5.48	5.58
FeO	0.67	0.46	0.39	0.60	0.51	0.75	0.54	0.58	0.62	0.65
CaO	28.41	28.87	28.99	28.71	28.82	28.01	28.76	28.72	28.62	28.6
F	1.92	1.52	1.49	1.75	1.58	2.03	1.64	1.72	1.81	1.88
O=F	-0.81	-0.64	-0.63	-0.74	-0.67	-0.85	-0.69	-0.72	-0.76	-0.79
Сумма / Total	99.19	99.36	99.37	99.26	99.33	99.15	99.31	99.28	99.24	99.21

Формулы рассчитаны методом по зарядам / The formulas are calculated using the charge method.

1. $(\text{Ca}_{0.98}\text{Fe}_{0.02})_{\Sigma 1.00}(\text{Ti}_{0.80}\text{Al}_{0.21})_{\Sigma 1.01}(\text{Si}_{0.99}\text{Al}_{0.01})_{\Sigma 1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.82}\text{F}_{0.18})$
2. $(\text{Ca}_{1.00}\text{Fe}_{0.01})_{\Sigma 1.01}(\text{Ti}_{0.81}\text{Al}_{0.18})_{\Sigma 0.99}(\text{Si}_{0.99}\text{Al}_{0.01})_{\Sigma 1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.86}\text{F}_{0.14})$
3. $(\text{Ca}_{1.00}\text{Fe}_{0.01})_{\Sigma 1.01}(\text{Ti}_{0.81}\text{Al}_{0.18})_{\Sigma 0.99}(\text{Si}_{1.00})_{\Sigma 1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.86}\text{F}_{0.14})$
4. $(\text{Ca}_{0.99}\text{Fe}_{0.02})_{\Sigma 1.01}(\text{Ti}_{0.80}\text{Al}_{0.19})_{\Sigma 0.99}(\text{Si}_{0.99}\text{Al}_{0.01})_{\Sigma 1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.84}\text{F}_{0.16})$
5. $(\text{Ca}_{1.00}\text{Fe}_{0.01})_{\Sigma 1.01}(\text{Ti}_{0.80}\text{Al}_{0.18})_{\Sigma 0.98}(\text{Si}_{0.99}\text{Al}_{0.01})_{\Sigma 1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.85}\text{F}_{0.15})$
6. $(\text{Ca}_{0.97}\text{Fe}_{0.02})_{\Sigma 0.99}(\text{Ti}_{0.79}\text{Al}_{0.22})_{\Sigma 1.01}(\text{Si}_{0.98}\text{Al}_{0.02})_{\Sigma 1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.81}\text{F}_{0.19})$
7. $(\text{Ca}_{0.99}\text{Fe}_{0.01})_{\Sigma 1.00}(\text{Ti}_{0.80}\text{Al}_{0.19})_{\Sigma 0.99}(\text{Si}_{0.99}\text{Al}_{0.01})_{\Sigma 1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.85}\text{F}_{0.15})$
8. $(\text{Ca}_{0.99}\text{Fe}_{0.02})_{\Sigma 1.01}(\text{Ti}_{0.80}\text{Al}_{0.19})_{\Sigma 0.99}(\text{Si}_{0.99}\text{Al}_{0.01})_{\Sigma 1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.84}\text{F}_{0.16})$
9. $(\text{Ca}_{0.99}\text{Fe}_{0.02})_{\Sigma 1.01}(\text{Ti}_{0.80}\text{Al}_{0.20})_{\Sigma 1.00}(\text{Si}_{0.99}\text{Al}_{0.01})_{\Sigma 1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.83}\text{F}_{0.17})$
10. $(\text{Ca}_{0.99}\text{Fe}_{0.02})_{\Sigma 1.01}(\text{Ti}_{0.79}\text{Al}_{0.20})_{\Sigma 0.99}(\text{Si}_{0.99}\text{Al}_{0.01})_{\Sigma 1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.82}\text{F}_{0.18})$

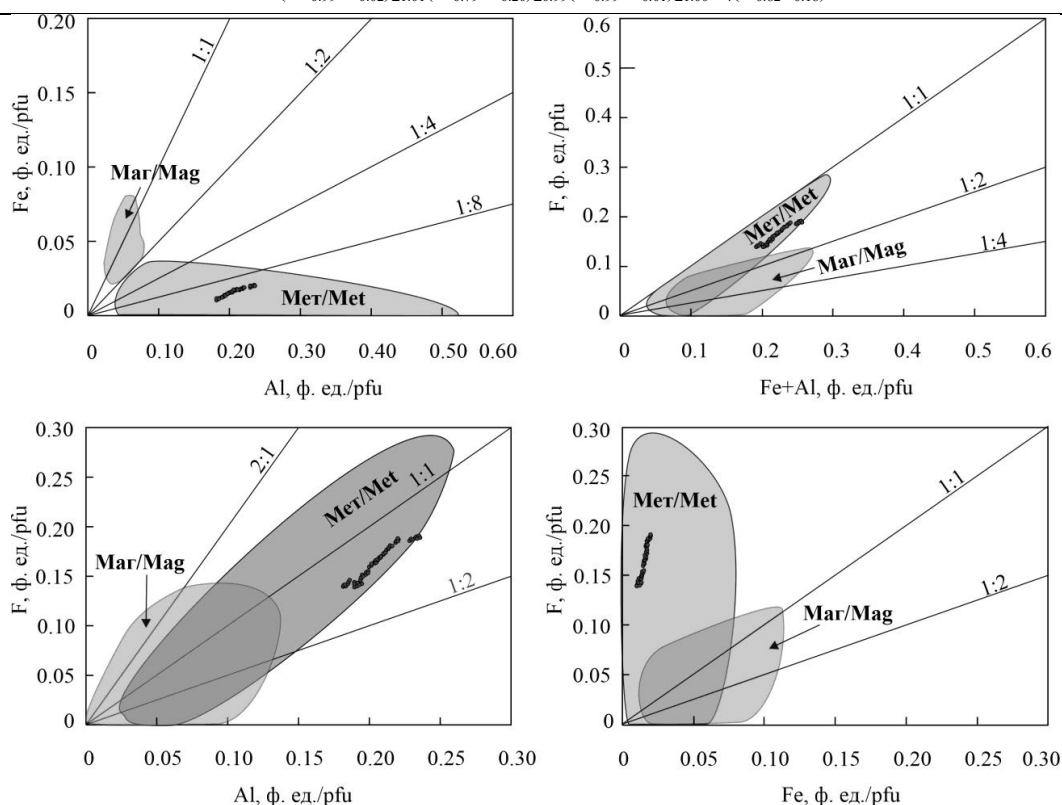


Рис. 3. Зависимость содержаний Al и Fe, Al и F, Fe+Al и F, Fe и F в титаните (ф.ед).

Поля состава титанита: Маг – титанит магматических пород, Мет – титанит метаморфических пород [Kowallis et al., 2022] /

Fig. 3. Dependence of the contents of Al-Fe, Al-F, Fe+Al-F, Fe-F in titanite (ph. units).

Fields of titanite composition: Mag – titanite of igneous rocks, Met – titanite of metamorphic rocks [Kowallis et al., 2022]

По содержанию глинозема изученный титанит (4,78–6,20 мас. %) максимально близок к титаниту (Al_2O_3 3,55–5,16 мас. %) из сланцев Иртышской Зоны смятия, формирование которого происходило в условиях зеленосланцевой фации метаморфизма [Наставко и др., 2024] и вторичному титаниту (Al_2O_3 до 7,72 мас. %) метагранитов орогена Сулу (Восточно-Центральный Китай), образовавшемуся в результате преобразования породы в условиях амфиболитовой фации метаморфизма [Chen et al., 2016].

По всей видимости, фтор-глиноземистый титанит из гранитов турочакского комплекса был сформирован в результате незначительных метаморфических преобразований. На это указывают: отношения Fe/Al (составляющее менее 1:2) и $(Fe+Al)/F$ (близкое к 1:1 и почти всегда $> 1:2$) в составе титанита, а также его приуроченность к хлоритизированным лейстам биотита. Таким образом, изученный титанит является продуктом низкоградного распада биотита, являясь при этом основным минералом, концентрирующим биотитовый титан [Tulloch, 1979].

Выводы

В результате проведенных исследований установлено наличие в гранитах третьей фазы внедрения турочакского граносиенит-гранит-лейкогранитового комплекса фтор-глиноземистого титанита (Al_2O_3 4,78–6,20 мас. %, F 1,49–2,03 мас. %). Обнаруженный титанит характеризуется отношениями Fe/Al и $(Fe+Al)/F$ типичными для титанита метаморфического генезиса.

Формирование титанита, на наш взгляд, является результатом низкоградного преобразования породы, в частности распада биотита.

Таким образом, изучение состава титанита и важных индикаторных отношений (Fe/Al и $(Fe+Al)/F$) позволит заранее узнать его природу и оценить возможность его применения в целях решения геохронологических задач.

Литература

1. Бабин Г.А., Гусев Н.И., Юрьев А.А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000. (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-45 – Новокузнецк. Объяснительная записка. СПб., 2007. – 665 с.
2. Балтыбаев Ш.К., Саватенков В.М., Петракова М.Е. T-t эволюция раннепротерозойских пород Северного Приладожья по данным изучения U-Pb, Rb-Sr и Sm-Nd систем в минералах. // Геодинамика и тектонофизика. – 2024. – Т. 15. № 3. – Art. No. 0759. DOI: 10.5800/GT-2024-15-3-0759.
3. Вах А.С., Авченко О.В., Карабцов А.А., Степанов В.А. Первая находка гротита в золоторудных месторождениях. // Доклады Академии наук. – 2009. – Т. 428. № 3. – С. 353–357.
4. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А. Позднекарбоновые гипабиссальные граниты и лейкограниты Большого Кавказа: вопросы петрогенезиса. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 117–130. DOI: 10.46698/VNC.2024.94.67.009.
5. Гусев А.И. Высоко-фракционированные гранитоиды Пшишского редкометалльного рудного поля Северного Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 1. – С. 96–111. DOI: 10.46698/VNC.2023.80.89.007.
6. Гусев А.И., Коробейников А.Ф. Петро-геохимические особенности и рудоносность двух подтипов анорогенных гранитоидов Горного Алтая. // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. № 1. – С. 27–35.
7. Дорошкевич А.Г., Шарыгин В.В., Пономарчук А.В., Изох А.Э., Избродин И.А. и др. Новые данные о возрасте пород пироксенитовых массивов р. Хани (Алдано-Становой щит). // Геосферные исследования. – 2022. – № 3. – С. 6–26. DOI: 10.17223/25421379/24/1.
8. Ерохин Ю.В., Иванов К.С., Хиллер В.В. Включения гротита в цирконе из гранитоидов.

дов кристаллического фундамента Южного Ямала. // Вестник МГТУ. – 2019. – Т. 22. № 1. – С. 5–11. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-5-11.

9. Коновалова Е.В., Холоднов В.В., Прибавкин С.В., Замятин Д.А. Элементы-минерализаторы (сера и галогены) в апатитах Шарташского гранитного массива и Березовского золоторудного месторождения. // Литосфера. – 2013. – № 6. – С. 65–72.

10. Кориш Е.Х., Савко К.А., Базилов Н.С., Ларионов А.Н. Возраст сиенитов палеопротерозойского дубравинского супрасубдукционного щелочно-карбонатитового комплекса Курского блока Сарматии. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2024. – № 1. – С. 4–13. DOI: 10.17308/geology/1609-0691/2023/4/4-13.

11. Наставко Е.В., Федосюк Г.А., Змеев Б.Ю. Гротит из сланцев Иртышской зоны смятия (Восточный Казахстан). // Вестник геонаук. – 2024. – № 12(360). – С. 3–11. DOI: 10.19110/geov.2024.12.1.

12. Скублов С.Г., Мамыкина М.Е., Ризванова Н.Г. U-Pb возраст и редкоэлементный состав титанита из гранитов Белокурихинского массива, Горный Алтай. // Вестник МГТУ. – 2021. – Т. 24. № 2. – С. 168–177. DOI: 10.21443/1560-9278-2021-24-2-168-177.

13. Тарарин И.А., Бадрединов З.Г., Чубаров В.М., Шарова О.И. Гротит гранат-слюдистых кристаллических сланцев шихтинской свиты Срединнокамчатского массива. // Доклады Академии наук. – 2011. – Т. 438. № 6. – С. 809–812.

14. Castelli D., Rubatto D. Stability of Al- and F-rich titanite in metacarbonate: petrologic and isotopic constraints from a polymetamorphic eclogitic marble of the internal Sesia Zone (Western Alps). // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2002. – Vol. 142. No. 6. – pp. 627–639. DOI: 10.1007/s00410-001-0317-6.

15. Chen Y.X., Zhou K., Zheng Y.F., Gao X.Y., Yang Y. Polygenetic titanite records the composition of metamorphic fluids during the exhumation of ultrahigh-pressure metagranite in the Sulu orogen. // Journal of Metamorphic Geology. – 2016. – Vol. 34. No. 6. – pp. 573–594. DOI: 10.1111/jmg.12194.

16. Erdmann S., Wang R., Huang F. et al. Titanite: A potential solidus barometer for granitic magma systems. // Comptes Rendus Geoscience. – 2019. – Vol. 351. – pp. 551–561. DOI: 10.1016/j.crte.2019.09.002.

17. Franz G., Spear F. Aluminous titanite (sphen) from the Eclogite Zone, south-central Tauern Window, Austria. // Chemical Geology. – 1985. – Vol. 50. No. 1/3. – pp. 33–46.

18. Frost B.R., Chamberlain K.R., Schumacher J.C. Sphen (titanite): phase relations and role as a geochronometer. // Chemical Geology. – 2001. – Vol. 172. No. 1-2. – pp. 131–148.

19. Hayden L.A., Watson E.B., Wark D.A. A thermobarometer for sphen (titanite). // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2008. – Vol. 155. Issue 4. – pp. 529–540. DOI: 10.1007/s00410-007-0256-y.

20. Kasay G.M., Borst A.M., Giebel J.R. et al. Petrogenesis and geodynamic setting of the Bingo alkaline-carbonatite complex, DRC: Constraints from petrography, geochemistry, C-O isotopes and U-Pb geochronology. // Precambrian Research. – 2024. – Vol. 408. – Art. No. 107421. DOI: 10.1016/j.precamres.2024.107421.

21. Kawohl A., Frimmel H.E., Whymark W.E. et al. Geology, geochemistry, and apatite/titanite U-Pb geochronology of ca. 1.88 Ga alkaline ultrabasic dykes in the Southern Province near Sudbury, Ontario. // Canadian Journal of Earth Sciences. – 2023. – Vol. 60. No. 1. – pp. 62–77. DOI: 10.1139/cjes-2022-0030.

22. Kowallis B.J., Christiansen E.H., Dorais M.J. et al. Variation of Fe, Al, and F Substitution in Titanite (Sphen). // Geosciences (Switzerland). – 2022. – Vol. 12. No. 6. – Art. No. 229. DOI: 10.3390/geosciences12060229.

23. Li Z., Guo H., Zeng W. et al. Geochemical, U-Pb Age and Nd-Isotopic Characteristics of Titanite in Alkaline Rocks from Dazhuang Nb-REE Deposit in Southern Margin of North China Craton. // Earth Science. – 2022. – Vol. 47. No. 4. – pp. 1415–1434. DOI: 10.3799/dqkx.2021.126.

24. Markl G., Piazzolo S. Stability of high-Al titanite from low-pressure calcsilicates in light of fluid and host-rock composition. // American Mineralogist. – 1999. – Vol. 84. No. 1/2. – pp. 37–47.

25. Oberti R., Smith D.C., Rossi G., Caucia F. The crystal chemistry of high-aluminium titanites. // *European Journal of Mineralogy*. – 1991. – Vol. 3. Issue 5. – pp. 777–792. DOI: 10.1127/ejm/3/5/0777.
26. Qiu E., Zhang Yu., Larson K. P. Dating Subhorizontal Ductile Fabric in the Feidong Complex via Zircon and Titanite U–Pb Geochronology: Insights into Middle Triassic Transpressional Deformation along the Southern Tan-Lu Fault Zone. // *Lithosphere*. – 2025. – Vol. 2025. No. 1. DOI: 10.2113/2025/lithosphere_2024_224.
27. Scibiorski E.A., Cawood P.A. Titanite as a petrogenetic indicator. // *Terra Nova*. – 2022. – Vol. 34. No. 3. – pp. 177–183. DOI: 10.1111/ter.12574.
28. Tropper P., Manning C.E., Essene E.J. The substitution of Al and F in titanite at high pressure and temperature: experimental constraints on phase relations and solid solution properties. // *Journal of Petrology*. – 2002. – Vol. 43. No. 10. – pp. 1787–1814. DOI: 10.1093/petrology/43.10.1787.
29. Tulloch A.J. Secondary Ca-Al silicates as low-grade alteration products of granitoid biotite. // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1979. – Vol. 69. No. 2. – pp. 105–117. DOI: 10.1007/bf00371854.
30. Van Schijndel V., Cutts K.A., Pereira I. et al. Minor minerals, major implications: using key mineral phases to unravel the formation and evolution of Earth's crust. // *Geological Society Special Publication*. – 2024. – Vol. 537. No. 1. – pp. 1–7. DOI: 10.1144/sp537-2023-110.
31. Warr L.N. IMA–CNMNC approved mineral symbols. // *Mineralogical Magazine*. – 2021. – Vol. 85. – pp. 291–320.
32. Wei R., Wang Y., Hu Q. et al. Mineral Chemistry and In Situ LA-ICP-MS Titanite U-Pb Geochronology of the Changba-Lijiagou Giant Pb-Zn Deposit, Western Qinling Orogen: Implications for a Distal Skarn Ore Formation. // *Minerals*. – 2024. – Vol. 14. No. 11. – Art. No. 1123. DOI 10.3390/min14111123.

References

1. Babin G.A., Gusev N.I., Yuryev A.A. et al. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000. (third generation). Altai-Sayan Series. Sheet N-45. Novokuznetsk. Explanatory note. Saint Petersburg. 2007. 665 p. (In Russ.)
2. Baltybaev Sh.K., Savatenkov V.M., Petrakova M.E. T-t evolution of Early Proterozoic rocks of the Northern Ladoga region according to the study of U-Pb, Rb-Sr and Sm-Nd systems in minerals. *Geodynamics and Tectonophysics*. 2024. Vol. 15. Issue 3. Art. No. 0759. DOI: 10.5800/GT-2024-15-3-0759. (In Russ.)
3. Vakh A.S., Avchenko O.V., Karabtsov A.A., Stepanov V.A. The first find of grothite in gold deposits. *Doklady Earth Sciences*. 2009. Vol. 428. No. 3. pp. 353–357. (In Russ.)
4. Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Kondrashov I.A. Late Carboniferous hypabyssal granites and leucogranites of the Greater Caucasus: petrogenesis issues. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 117–130. (In Russ.)
5. Gusev A.I. High-fractionation granitoids of Pshish rare metal of district the Northern Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 96–111. (In Russ.)
6. Gusev A.I., Korobeynikov A.F. Petro-geochemical features and ore-bearing capacity of two subtypes of anorogenic granitoids of Gorny Altai. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*. 2014. Vol. 325. No. 1. pp. 27–35. (In Russ.)
7. Doroshkevich A.G., Sharygin V.V., Ponomarchuk A.V., Izokh A.E., Izbrodin I.A. et al. New age data for rocks of Khani intrusions (Aldan-Stanovoy shield). *Geosphere Research*. 2022. No. 3. pp. 6–26. DOI: 10.17223/25421379/24/1. (In Russ.)
8. Erokhin Yu.V., Ivanov K.S., Hiller V.V. The inclusion of grothite in the zircon from granitoids of the crystalline basement of the Southern Yamal Peninsula. *Vestnik MSTU*. 2019. Vol. 22. No. 1. pp. 5–11. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-5-11. (In Russ.)
9. Konovalova E.V., Kholodnov V.V., Pribavkin S.V., Zamyatin D.A. Chemical components of mineralization (sulfur and halogens) in apatites of Shartash granite massive and Berezovsk gold deposit. *Lithosphere*. 2013. No. 6. pp. 65–72. (In Russ.)

10. Korish E.Kh., Savko K.A., Bazikov N.S., Larionov A.N. The age of the Paleoproterozoic Dubravinsky suprasubduction alkali-carbonatite complex syenites, Kursk block, Sarmatia. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2024. No. 1. pp. 4–13. DOI: 10.17308/geology/1609-0691/2023/4/4-13. (In Russ.)
11. Nastavko E.V., Fedosyuk G.A., Zmeev B.Yu. Grothite from schists of the irtysh shear zone (East Kazakhstan). *Vestnik of Geosciences*. 2024. No. 12(360). pp. 3–11. DOI: 10.19110/geov.2024.12.1. (In Russ.)
12. Skublov S.G., Mamykina M.E., Rizvanova N.G. U-Pb age and rare-element composition of titanite from granites of the Belokurikhinsky massif, Altai Mountains. *Vestnik of MSTU*. 2021. Vol. 24. No. 2. pp. 168–177. DOI: 10.21443/1560-9278-2021-24-2-168-177. (In Russ.)
13. Tararin I.A., Badredinov Z.G., Chubarov V.M., Sharova O.I. Grothite from garnet-micaceous crystalline schist of the Shikhtinskaya suite in the middle Kamchatka massif. *Doklady Earth Sciences*. 2011. Vol. 438. No. 6. pp. 809–812. (In Russ.)
14. Castelli D., Rubatto D. Stability of Al- and F-rich titanite in metacarbonate: petrologic and isotopic constraints from a polymetamorphic eclogitic marble of the internal Sesia Zone (Western Alps). *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2002. Vol. 142. No. 6. pp. 627–639. DOI: 10.1007/s00410-001-0317-6.
15. Chen Y.X., Zhou K., Zheng Y.F., Gao X.Y., Yang Y. Polygenetic titanite records the composition of metamorphic fluids during the exhumation of ultrahigh-pressure metagranite in the Sulu orogen. *Journal of Metamorphic Geology*. 2016. Vol. 34. No. 6. pp. 573–594. DOI: 10.1111/jmg.12194.
16. Erdmann S., Wang R., Huang F. et al. Titanite: A potential solidus barometer for granitic magma systems. *Comptes Rendus Geoscience*. 2019. Vol. 351. pp. 551–561. DOI: 10.1016/j.crte.2019.09.002.
17. Franz G., Spear F. Aluminous titanite (sphene) from the Eclogite Zone, south-central Tauern Window, Austria. *Chemical Geology*. 1985. Vol. 50. No. 1/3. pp. 33–46.
18. Frost B.R., Chamberlain K.R., Schumacher J.C. Sphene (titanite): phase relations and role as a geochronometer. *Chemical Geology*. 2001. Vol. 172. No. 1-2. pp. 131–148.
19. Hayden L.A., Watson E.B., Wark D.A. A thermobarometer for sphene (titanite). *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2008. Vol. 155. Issue 4. pp. 529–540. DOI: 10.1007/s00410-007-0256-y.
20. Kasay G.M., Borst A.M., Giebel J.R. et al. Petrogenesis and geodynamic setting of the Bingo alkaline-carbonatite complex, DRC: Constraints from petrography, geochemistry, C-O isotopes and U-Pb geochronology. *Precambrian Research*. 2024. Vol. 408. Art. No. 107421. DOI: 10.1016/j.precamres.2024.107421.
21. Kawohl A., Frimmel H.E., Whymark W.E. et al. Geology, geochemistry, and apatite/titanite U–Pb geochronology of ca. 1.88 Ga alkaline ultrabasic dykes in the Southern Province near Sudbury, Ontario. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 2023. Vol. 60. No. 1. pp. 62–77. DOI: 10.1139/cjes-2022-0030.
22. Kowallis B.J., Christiansen E.H., Dorais M.J. et al. Variation of Fe, Al, and F Substitution in Titanite (Sphene). *Geosciences (Switzerland)*. 2022. Vol. 12. No. 6. Art. No. 229. DOI: 10.3390/geosciences12060229.
23. Li Z., Guo H., Zeng W. et al. Geochemical, U-Pb Age and Nd-Isotopic Characteristics of Titanite in Alkaline Rocks from Dazhuang Nb-REE Deposit in Southern Margin of North China Craton. *Earth Science*. 2022. Vol. 47. No. 4. pp. 1415–1434. DOI: 10.3799/dqkx.2021.126.
24. Markl G., Piazzolo S. Stability of high-Al titanite from low-pressure calcsilicates in light of fluid and host-rock composition. *American Mineralogist*. 1999. Vol. 84. No. 1/2. pp. 37–47.
25. Oberti R., Smith D.C., Rossi G., Caucia F. The crystal chemistry of high-aluminium titanites. *European Journal of Mineralogy*. 1991. Vol. 3. Issue 5. pp. 777–792. DOI: 10.1127/ejm/3/5/0777.
26. Qiu E., Zhang Yu., Larson K. P. Dating Subhorizontal Ductile Fabric in the Feidong Complex via Zircon and Titanite U–Pb Geochronology: Insights into Middle Triassic Transpressional Deformation along the Southern Tan-Lu Fault Zone. *Lithosphere*. 2025. Vol. 2025. No. 1. DOI: 10.2113/2025/lithosphere_2024_224.

27. Scibiorski E.A., Cawood P.A. Titanite as a petrogenetic indicator. *Terra Nova*. 2022. Vol. 34. No. 3. pp. 177–183. DOI: 10.1111/ter.12574.
28. Tropper P., Manning C.E., Essene E.J. The substitution of Al and F in titanite at high pressure and temperature: experimental constraints on phase relations and solid solution properties. *Journal of Petrology*. 2002. Vol. 43. No. 10. pp. 1787–1814. DOI: 10.1093/petrology/43.10.1787.
29. Tulloch A.J. Secondary Ca-Al silicates as low-grade alteration products of granitoid biotite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1979. Vol. 69. No. 2. pp. 105–117. DOI: 10.1007/bf00371854.
30. Van Schijndel V., Cutts K.A., Pereira I. et al. Minor minerals, major implications: using key mineral phases to unravel the formation and evolution of Earth's crust. *Geological Society Special Publication*. 2024. Vol. 537. No. 1. pp. 1–7. DOI: 10.1144/sp537-2023-110.
31. Warr L.N. IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*. 2021. Vol. 85. pp. 291–320.
32. Wei R., Wang Y., Hu Q. et al. Mineral Chemistry and In Situ LA-ICP-MS Titanite U-Pb Geochronology of the Changba-Lijiagou Giant Pb-Zn Deposit, Western Qinling Orogen: Implications for a Distal Skarn Ore Formation. *Minerals*. 2024. Vol. 14. No. 11. Art. No. 1123. DOI 10.3390/min14111123.

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2026.94.11.001

Оригинальная статья

Особенности сейсмического режима западного и восточного сегментов Крымско-Черноморского региона

Ю.М. Вольфман[✉], Е.Я. Колесникова[✉], М.Н. Бондарь[✉]

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

Статья поступила: 09.12.2025, доработана: 27.02.2026, принята к публикации: 04.03.2026

Резюме: Актуальность работы обусловлена необходимостью оценки параметров сейсмического режима в западном и восточном сегментах Крымско-Черноморского региона, которые различаются строением и суперпозицией по отношению к основным сейсмически активным структурам Средиземноморского пояса. **Цель исследований:** изучение пространственно-временных особенностей и периодов повторяемости землетрясений, сравнительный анализ сейсмического режима в пределах западного и восточного сегментов региона, идентификация максимумов сейсмической активности. **Фактологической основой** послужили данные каталога землетрясений Института сейсмологии и геодинамики КФУ им. В.И. Вернадского за 1950–2024 годы. **Методы исследования:** сравнительный анализ параметров, характеризующих пространственные особенности сейсмичности региона; анализ графиков повторяемости землетрясений, выявление общих закономерностей и отличительных особенностей сейсмических режимов в пределах исследуемых сегментов; анализ периодичности всплесков сейсмической активности и сопоставление их параметров. **Результаты исследований.** В процессе анализа графиков повторяемости землетрясений для западного и восточного сегментов региона установлены фрагменты с высокой степенью сходимости значений параметров (в интервале классов $K=8-12$). Данный режим является «фоновым», характеризующим основной тренд развития сейсмического процесса всего региона. Существенные различия графиков повторяемости в интервалах низких ($K=3-8$) и высоких ($K>12$) энергетических классов отражают значительные отклонения сейсмического режима от его фонового тренда. Эти различия обусловлены особенностями строения региона и влиянием геодинамических процессов в пределах территории Турции и сопредельных районов Кавказа. Также установлено, что периоды повышенной активности, определяемые по пиковым значениям выделившейся сейсмической энергии, в западном и восточном сегментах региона проявляются асинхронно с периодичностью 12–13 лет. При этом пиковые значения в пределах одного сегмента приходятся на середину периодов относительного затишья в смежном сегменте и наоборот.

Ключевые слова: землетрясения, сейсмический режим, выделившаяся энергия, графики повторяемости, пиковые значения.

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

Для цитирования: Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я., Бондарь М.Н. Особенности сейсмического режима западного и восточного сегментов Крымско-Черноморского региона. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 20–32. DOI: 10.46698/VNC.2026.94.11.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.94.11.001

Original papers

Features of the seismic regime in the western and eastern segments of the Crimean-Black Sea region

Yu.M. Volfman[✉], E.Ya. Kolesnikova[✉], M.N. Bondar[✉]

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

Received: 09.12.2025, revised: 27.02.2026, accepted: 04.03.2026

Abstract: The relevance of this work is due to the need to assess the parameters of the seismic regime in the western and eastern segments of the Crimean-Black Sea region, which differ in structure and superposition relative to the main seismically active structures of the Mediterranean belt. **The aim** of the research is to study the spatial and temporal features and recurrence periods of earthquakes, to conduct a comparative analysis of the seismic regime within the western and eastern segments of the region, and to identify the peaks of seismic activity. **The data are based** on the earthquake catalog of the Institute of Seismology and Geodynamics at V.I. Vernadsky CFU for the years 1950–2024. **Research methods:** comparative analysis of parameters characterizing the spatial features of the region's seismicity; analysis of earthquake recurrence graphs, identification of general patterns and distinctive features of seismic regimes within the studied segments; analysis of the periodicity of seismic activity bursts and comparison of their parameters. **Results.** In the process of analyzing the earthquake recurrence graphs for the western and eastern segments of the region, fragments with a high degree of convergence of parameter values (in the interval of $K=8-12$ classes) were established. This mode is a “background” mode that characterizes the main trend of the seismic process development in the entire region. Significant differences in the recurrence graphs for low ($K=3-8$) and high ($K>12$) energy class intervals reflect significant deviations from the background trend of the seismic regime. These differences are influenced by the specific geological structure of the region and the impact of geodynamic processes within Turkey and the adjacent regions of the Caucasus. It has also been established that periods of increased activity, determined by the peak values of released seismic energy, occur asynchronously in the western and eastern segments of the region with a periodicity of 12–13 years. Moreover, the peak values within one segment occur in the middle of periods of relative quiescence in the adjacent segment, and vice versa.

Keywords: earthquakes, seismic regime, released energy, recurrence graphs, peak values.

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

For citation: Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya., Bondar M.N. Features of the seismic regime in the western and eastern segments of the Crimean-Black Sea region. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 20–32. DOI: 10.46698/VNC.2026.94.11.001

Введение

Основные сейсмогенные структуры Крымско-Черноморского региона протягиваются вдоль побережья Крыма и Кавказа [Мониторинг ..., 2014; Общее ..., 2016; Пустовитенко и др., 1989] и приурочены к континентальному склону Черного моря (рис. 1). Именно в пределах одной из них – Южнобережной, произошло самое сильное из современных сейсмических событий в регионе – катастрофическое Ялтинское землетрясение 11.09.1927 г. с $M_w=6,9$. Масштаб вызванных им разрушений обусло-

вил организацию в Крыму в 1927–1928 гг. первой в стране стационарной системы сейсмического мониторинга [Мониторинг ..., 2014]. За весь период инструментальных наблюдений (без малого 100 лет) крымскими сейсмостанциями было зарегистрировано более 4-х с половиной тысяч местных землетрясений.

Сейсмическая активность Крымско-Черноморского региона обусловлена его геотектонической суперпозицией и сложным строением. Эти же факторы предопределили особенности проявления сейсмических режимов в пределах его западного и восточного сегментов. Располагаясь на периферии Средиземноморского складчатого пояса, исследуемый регион включает (с севера на юг): юго-западный склон дорифейской Восточно-Европейской платформы, эпиварисскую Скифскую плиту с системой наложенных альпийских прогибов, горные сооружения Крыма и Кавказа, а также Черноморскую котловину, наиболее глубоководные части которой – Западно- и Восточно-Черноморская впадины, характеризуются корой субокеанического типа (рис. 1). Более того, и Горный Крым, ограничивающий с севера основную Южнобережную сейсмогенную зону, по мнению некоторых исследователей, неоднороден в тектоническом отношении. Его юго-западная часть идентифицируется как эпиплатформенный ороген, который образовался вследствие активизации южного края Скифской плиты на альпийском этапе, тогда как восточный фланг Горного Крыма вместе с южной частью Керченского полуострова входят в состав области альпийской складчатости, являясь северо-западным периклинальным замыканием сооружений Большого Кавказа [Пчелинцев, 1966], обрамляемым поясом грязевых вулканов. Граница между ними весьма условна, но практически совпадает с зоной разграничения Крымско-Черноморского региона на западный и восточный сегменты (рис. 1, 2).

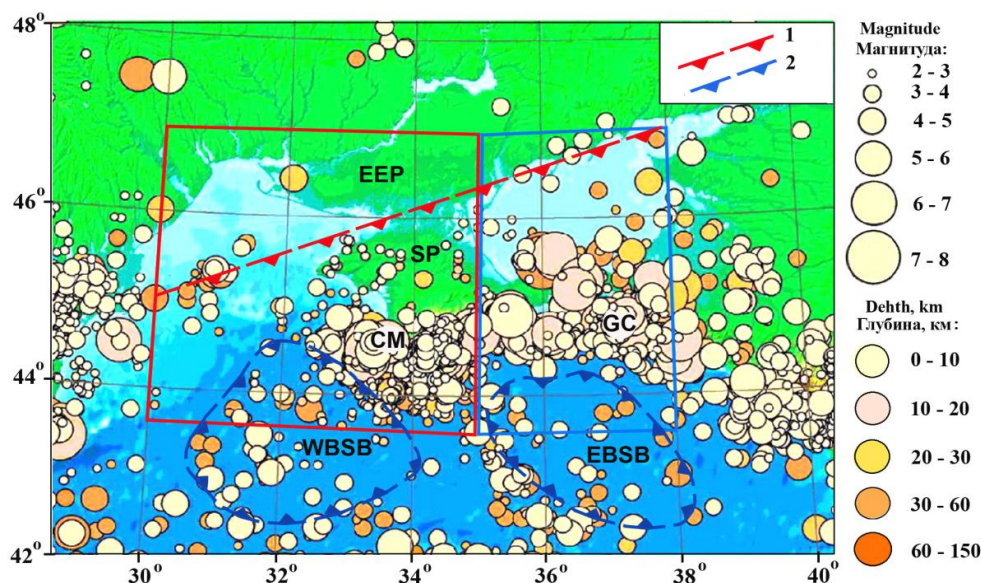


Рис. 1. Схема сейсмичности Крымско-Черноморского региона (по [Мониторинг ..., 2014], фрагмент) с элементами тектонического районирования. Условные обозначения: 1 – зона сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты; 2 – границы глубоководных впадин с корой субокеанического типа. Буквами обозначены: ЕЕР – склон Восточно-Европейской платформы, SP – Скифская плита, CM – Горный Крым, GC – Большой Кавказ, WBSB и EBSB – Западно- и Восточно-Черноморская впадины. Красный и синий прямоугольники – границы западного и восточного сегментов региона /

Fig. 1. Seismicity map of the Crimean-Black Sea region (according to [Monitoring ..., 2014], fragment) with elements of tectonic zoning. Symbols: 1 – zone of junction of the East European platform and the Scythian plate; 2 – boundaries of deep-water depressions with sub-oceanic type of crust. The letters stand for: EEP – the slope of the East European Platform, SP – the Scythian Plate, CM – the Mountainous Crimea, GC – the Greater Caucasus, WBSB and EBSB – the West and East Black Sea depressions. The red and blue rectangles represent the boundaries of the western and eastern segments of the region

Вследствие периферийного положения Крымско-Черноморского региона в системе Средиземноморского пояса, уровень сейсмичности и вероятность возникновения сильных землетрясений в его пределах ниже, чем на территории Малой Азии (в основном, в Турции) и сопредельных районов Кавказа, где сосредоточены основные сейсмогенные зоны центрального Средиземноморья [Глумов и др., 2004; Рогожин и др., 2015; Рогожин, 2012; Свалова, Заалишвили, 2024]. Последние унаследовали положение зон палеосубдукции, которые смещались в южном направлении в процессе геодинамической эволюции Средиземноморского пояса по мере причленения к Евразии литосферных плит (Африки, Аравии) и субплит (террейнов) северных окраин Палео- и Неотетиса [Короновский, Демина, 1999; Никишин, Ершов, 2004; Сенин и др., 2022; Nikishin et al., 2011; Zonenshain, Le Pichon, 1986; Okay, Nikishin, 2015; Saintot et al., 1999; Stephenson, Schellart, 2010].

Так, положение позднепалеозойской зоны субдукции трассируется сейсмичностью Большого Кавказа–Копетдага, мезозойской – Северо-Анатолийской и Эльбурс-Малокавказской сейсмогенными системами, кайнозойской – зонами Восточно-Анатолийского разлома и Загроса [Nikishin et al., 2011; Рогожин, 2012 и др.]. Эти структуры формируют сейсмический климат центрального Средиземноморья, оказывая влияние и на сейсмичность Крымско-Черноморского региона. Располагаясь на значительном удалении от Крыма, все они (за исключением системы Большого Кавказа–Копетдага) отделены от него впадиной Черного моря, которая, выступая в роли своеобразного демпфера, гасит часть тектонических напряжений, генерируемых процессами геодинамического взаимодействия литосферных плит в пределах Малой Азии и сопредельных районов. При этом в самой Черноморской впадине также высвобождается значительное количество сейсмической энергии [Пустовитенко, Кульчицкий, 1991] в виде землетрясений относительно высоких энергетических классов (например, события 09.06.1997 г. с $K=11,7$; 09.10.1997 г. с $K=10,7$; 30.09.1998 г. с $K=10,6$ и др.).

Результаты анализа пространственно-временного распределения очагов землетрясений и выделившейся сейсмической энергии в пределах западного и восточного сегментов Крымско-Черноморского региона отражают различный характер проявления сейсмического режима. Особую тревогу вызывает высокий уровень сейсмической активности в восточной части региона, где сосредоточено большое количество транспортных, энергопоставляющих и иных коммуникаций, связывающих Крым с материковой частью России.

Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью исследования особенностей сейсмического режима в пределах различных сегментов Крымско-Черноморского региона, различающихся строением и положением по отношению к основным сейсмогенерирующим структурам Средиземноморского пояса. Целью работы является сравнительный анализ сейсмического режима в пределах западного (в координатах $\varphi=43,5\div 47^\circ\text{N}$, $\lambda=30\div 35^\circ\text{E}$) и восточного (с координатами $\varphi=43,5\div 47^\circ\text{N}$, $\lambda=35\div 38^\circ\text{E}$) сегментов Крымско-Черноморского региона (рис. 1). Под сейсмическим режимом при этом понимаются пространственно-временные особенности распределения совокупностей землетрясений разных энергетических классов [Общее ..., 2016], а также периодичность проявления всплесков повышенной активности на фоне относительного сейсмического затишья.

Исходные данные и методы исследования

Фактологической основой исследований послужили данные сводного каталога землетрясений Института сейсмологии и геодинамики Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. В состав анализируемой выборки вошли все

события (3551 землетрясение), произошедшие в Крымско-Черноморском регионе с 1950 по 2024 годы – в период, который характеризуется относительно высокой представительностью энергетических классов регистрируемых событий [Мониторинг ..., 2014]. Для внесения землетрясений в каталоги по их пространственному расположению весь регион был условно разделен на несколько районов [Пустовитенко и др., 1989], что послужило основой и для определения границ исследуемых – западного и восточного – сегментов. К западному сегменту отнесены сейсмические события, произошедшие в районах №№1–3, 6 и 8; к восточному – в районах 4, 5, 7 (рис. 2). Таким образом, в географическом отношении западный сегмент охватывает юго-западную и центральную части Горного Крыма, Равнинный Крым, а также – центральную и западную акватории Черного моря. В состав восточного сегмента вошли прилегающие к Кавказу территории Керченского и Таманского полуостровов, акватории Азовского и восточной части Черного моря. Землетрясения района №9 (глубоководной части Черного моря, к югу от широты $\varphi=43,5^\circ\text{N}$) в обработку не включались.

Методическую основу исследований составили приемы сравнительного пространственно-временного анализа параметров сейсмической активности в пределах западного и восточного сегментов региона. Мерой интенсивности каждого из землетрясений являлись значения их энергетических классов K_p [Пустовитенко, Кульчицкий, 1974], соответствующие величине логарифма выделившейся в очаге сейсмической энергии (в *Джоулях*). Пространственный анализ сейсмической активности осуществлялся по количеству (или плотности на единицу площади с размером ячейки $2\times 2^\circ$) сейсмических событий (ΣN), а также (поскольку землетрясения характеризуются энергетическими классами в широком диапазоне с $K=3-15$) – по величине суммарной выделившейся энергии в очагах (ΣE , *Дж*) или по значению ее логарифма ($\text{Lg}\Sigma E$). Эти же параметры послужили основой сравнительного анализа сейсмической активности во времени и, наряду с графиками повторяемости землетрясений разной интенсивности, позволили охарактеризовать как общие закономерности сейсмического процесса в регионе, так и различия его проявления в пределах западного и восточного сегментов.

Результаты исследований и их обсуждение

Особенности пространственно-временного распределения очагов землетрясений и выделившейся в них сейсмической энергии. Результаты анализа особенностей распределения указанных параметров показали весьма существенные различия сейсмического режима в пределах западного и восточного сегментов Крымско-Черноморского региона (рис. 2).

Так, за последние 75 лет (с 1950 по 2024 годы) в западном сегменте произошло 2723 землетрясения (75 % от общего количества), при этом их вклад в общий энергетический баланс составил всего $22 \cdot 10^{12}$ Дж (менее 2 % от суммарной энергии всего региона). В то же время, в восточной части было зафиксировано 828 землетрясений (23 % от общего количества), в которых выделилось около $1048 \cdot 10^{12}$ Дж сейсмической энергии, что составляет 98 % от суммарной энергии землетрясений всего региона. Отчасти данное соотношение количества землетрясений обусловлено разными уровнями представительности событий низких энергетических классов в пределах исследуемых сегментов, о чем подробнее будет сказано ниже. Тем не менее, можно полагать вполне реальным наличие обратной зависимости между количеством сейсмических событий и их интенсивностью: в западном сегменте землетрясения происходят гораздо чаще и в большем количестве, в то время как в восточном сегменте относительно небольшое количество событий индуцировало почти всю сейсмическую энергию региона. Данные различия иллюстрируют схемы распределения величин

логарифма суммарной выделившейся сейсмической энергии ($Lg\Sigma E$) и количества землетрясений (ΣN) в регионе за период с 1950 по 2024 годы (рис. 2).

Подобное соотношение подтверждается и данными наблюдений за январь–октябрь 1925 года: из 131-го зарегистрированного в регионе землетрясения только четыре (то есть менее 3 % от общего количества, в том числе – событие 12.01.2025 г. с $K=11,5$) произошло в восточном сегменте (в Керченско-Таманском районе). Однако их вклад в годовой энергетический баланс региона составил почти 94 % ($317 \cdot 10^9$ Дж), подтверждая вывод о том, что в восточном сегменте землетрясения происходят реже, чем в западном, однако в основной своей массе они являются более интенсивными.

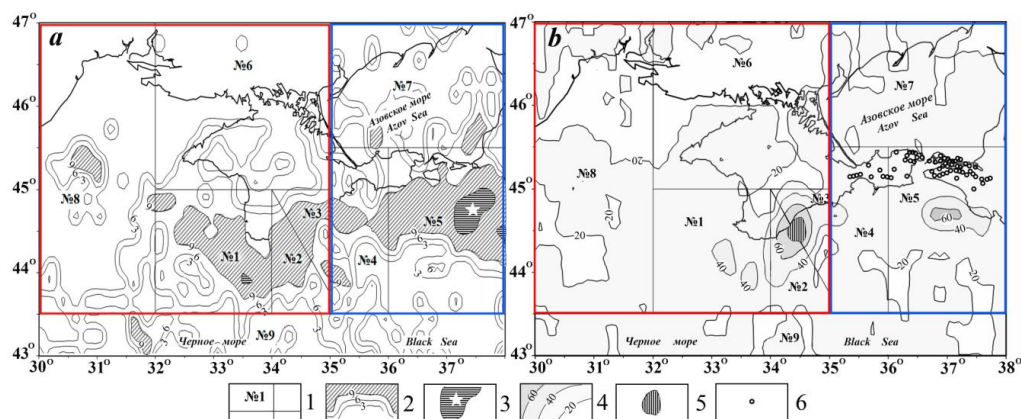


Рис. 2. Распределение величин логарифма суммарной выделившейся сейсмической энергии (а) и количества землетрясений (б) Крымско-Черноморского региона в период с 1950 по 2024 годы (размер ячейки $2 \times 2^\circ$). Условные обозначения: 1 – границы и номера сейсмических районов; 2–3 – изолинии равных значений (2) и область максимальных ($Lg\Sigma E \geq 12,0$) значений (3) логарифма суммарной сейсмической энергии, звездочка – землетрясение 12.07.1966 г. с $K=15,0$; 4–5 – изолинии равных значений (4) и область локализации (5) максимального (более 200) количества очагов землетрясений; 6 – грязевые вулканы. Красный и синий прямоугольники – границы западного и восточного сегментов региона /

Fig. 2. Distribution of the logarithm of the total seismic energy released (a) and the number of earthquakes (b) in the Crimean-Black Sea region from 1950 to 2024 ($2 \times 2^\circ$ cell size). Symbols: 1 – boundaries and numbers of seismic regions; 2–3 – isolines of equal values (2) and the area of maximum ($Lg\Sigma E \geq 12,0$) values (3) of the logarithm of the total seismic energy, asterisk – earthquake of July 12, 1966 with $K=15,0$; 4–5 – isolines of equal values (4) and the area of localization (5) of the maximum (more than 200) number of earthquake sources; 6 – mud volcanoes. The red and blue rectangles represent the boundaries of the western and eastern segments of the region

Сравнение графиков повторяемости землетрясений западного и восточного сегментов позволило выявить как общие особенности сейсмического режима в их пределах, так и существенные различия его проявления, что отражают результаты фрагментации графиков по интервалам энергетических классов (рис. 3 а, б).

Центральная часть графиков в интервале классов $K=8-12$ (I фрагмент) указывает на высокий уровень сходства сейсмического режима в обоих сегментах региона (рис. 3 а, б). Левыми ограничениями этого фрагмента служат уровни представительности, значения которых приблизительно одинаковы (для западной части региона – $K \geq 7$, для восточной – $K \geq 8$), правыми – максимальные значения K , удовлетворяющие линейному их распределению. В указанном интервале графики практически тождественны, поскольку соответствующие каждому классу значения ΣN и ΣE имеют весьма близкие значения. Это же подтверждают и незначительные отклонения указанных параметров от их средних значений по всему региону: в обоих случаях величина отклонений составляет менее 20 % (рис. 3 с, d).

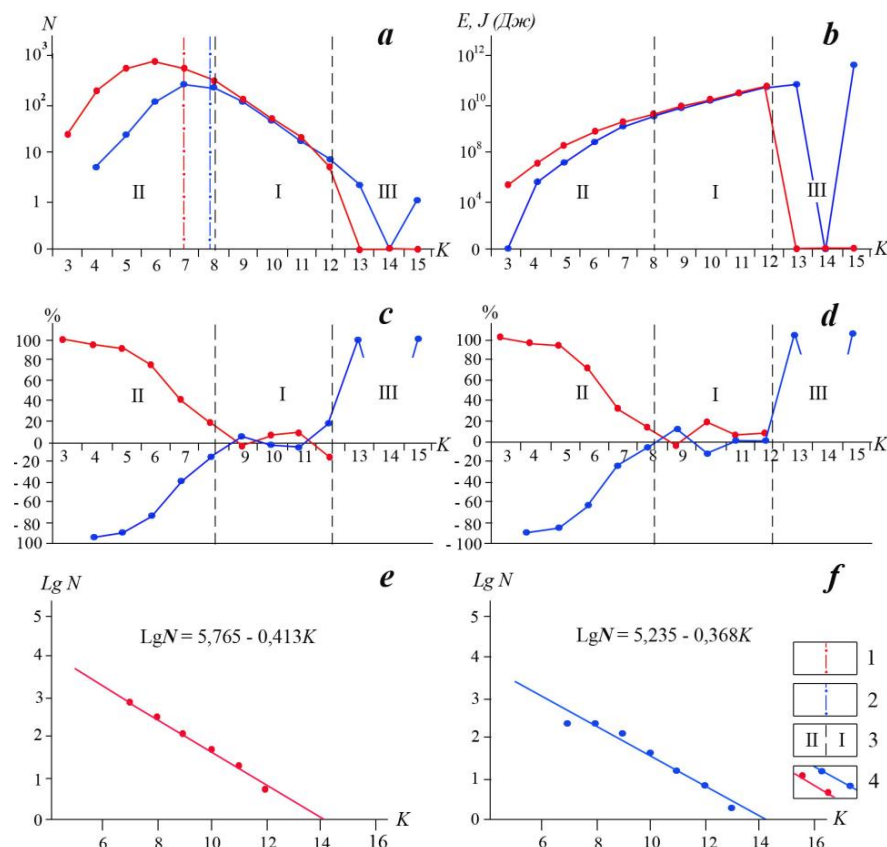


Рис. 3. Сопоставление параметров сейсмичности западного (красные графики) и восточного (синие графики) сегментов региона: **a, b** – распределения по классам количества землетрясений и выделившейся энергии; **c, d** – отклонения этих параметров от средних значений по региону; **e, f** – графики повторяемости (фоновые тренды) для западного и восточного сегментов. Условные обозначения: 1-2 – уровни представительности, соответственно, для западного и восточного сегментов; 3 – границы фрагментов распределения параметров с разными режимами; 4 – графики повторяемости (характеризующие фоновые тренды) западного (красный) и восточного (синий) сегментов /

Fig. 3. Comparison of seismicity parameters for the western (red graphs) and eastern (blue graphs) segments of the region: **a, b** – distributions of the number of earthquakes and seismic energy; **c, d** – deviations of these parameters from the regional averages; **e, f** – repeatability schedule (background trends) for the western ($K=7-12$) and eastern ($K=8-13$) segments. Symbols: 1-2 – levels of representativeness for the western and eastern segments, respectively; 3 – boundaries of parameter distribution fragments with different modes; 4 – repeatability graphs (characterizing background trends) for the western (red) and eastern (blue) segments

Согласно закону Гуттенберга-Рихтера (применительно к энергетическим классам – $LgN=a-bK$), распределение в западном сегменте региона аппроксимирует формула $LgN=5,765-0,413K$, в восточном – $LgN=5,235-0,368K$ (рис. 3 *e, f*). В этих уравнениях численные значения коэффициентов имеют близкие значения: их отклонения от среднего не превышают 9–11 %. Из этого следует, что угол наклона обоих графиков примерно одинаков, а сейсмический режим – как по количеству землетрясений, так и в их энергетическом наполнении – можно полагать сходным в пределах исследуемых сегментов Крымско-Черноморского региона.

Совпадающие интервалы обоих графиков с $K=8-12$ характеризуют краткосрочные параметры сейсмического режима, поскольку исследуемый период составляет всего 75 лет, и являются *фоновыми* (если это понятие применимо не только к совокупностям статических величин, но и к трендам динамических процессов). Учитывая близость значений коэффициентов в уравнениях для западного и восточного сег-

ментов, общий фоновый тренд сейсмического режима всего региона можно описать формулой $LgN=6,187-0,433K$.

Левые ветви графиков в интервале $K=3-8$ (*II фрагмент*), нисходящие относительно линии общего тренда, указывают на существенное различие сейсмических режимов в западном и восточном сегментах. Как отмечалось, это различие отчасти обусловлено разными уровнями представительности, на что указывает и отсутствие в пределах восточного сегмента зарегистрированных землетрясений с $K=3$ за рассматриваемый период. Однако это обстоятельство лишь частично объясняет огромную разницу (более, чем в 4 раза) в количестве регистрируемых событий с $K \leq 8$: 2528 землетрясений – на западе и 627 – на востоке. Соответственно, и выделение энергии происходило в пропорции $0,103 \cdot 10^{12}$ Дж к $0,077 \cdot 10^{12}$ Дж, т.е. отличалось почти в полтора раза. Однако приведенные данные свидетельствуют также и о том, что среднее (удельное, из расчета на одно сейсмическое событие) количество выделившейся энергии в восточной части региона было почти в три раза выше, чем в западной (соответственно, $123 \cdot 10^6$ и $41 \cdot 10^6$ Дж).

Отличительной особенностью правой части графиков повторяемости в интервале с $K > 12$ (*III фрагмент*) является отсутствие землетрясений высоких энергетических классов в западном сегменте Крымско-Черноморского региона в период с 1950 по 2024 годы. В то же время, в пределах восточного сегмента за это время произошло 3 значимых события: одно из них (12.07.1966 г.) – с $K=15,0$; два (03.09.1978 и 09.11.2002 г.) – с $K=13,2$ и $K=13,0$. Именно эти землетрясения внесли основной вклад в региональный энергетический баланс, так как количество выделившейся в них сейсмической энергии составило 98 % от суммарной энергии восточного сегмента или 96 % от общего количества энергии региона. При этом, если последние из этих событий по своим параметрам еще удовлетворяют фоновому тренду (рис. 3 *г*), то параметры землетрясения 12.07.1966 г. с $K=15,0$ «выпадают» из него, резко отклоняясь вверх от его линии.

Это подтверждают расчеты максимально возможного (в рамках фонового тренда) энергетического класса землетрясений (K_{max}) как для каждого изучаемого сегмента, так и для региона в целом. Приняв в вышеприведенных уравнениях (поскольку логарифм нуля считается неопределённым) значение LgN условно минимальным (например, $LgN=0,001$), получим предельные значения K_{max} , удовлетворяющие фоновому распределению. Для западного сегмента эта величина составляет $K_{max}=13,956$, для восточного – $K_{max}=14,223$, для всего региона – $K_{max}=14,286$. Следовательно, землетрясения с $K > 14$ уже не отвечают параметрам фонового тренда: их следует расценивать как аномальные проявления сейсмической активности в регионе.

К таковым в восточном сегменте относится землетрясение 12.07.1966 года с $K=15,0$. Однако максимально значимым (за весь период проведения инструментальных наблюдений – с 1927 г. по настоящее время), безусловно, являлся катастрофический взрыв сейсмической активности в западном сегменте региона, произошедший в июне и сентябре 1927 года. Он реализовался в виде разрушительного Ялтинского землетрясения 11.09.1927 г. с $K=18,2$ ($M_w=6,9$), которому предшествовал форшок 26.06.1927 г. с $K=16,7$ ($M_w=6,3$) [Мониторинг ..., 2014; Пустовитенко и др., 1989]. Затем в течение короткого времени (11–24 сентября) последовала серия афтершоков, девять из которых имели $K \geq 14$. Общее количество выделившейся при этом энергии составило $1816253 \cdot 10^{12}$ Дж ($Lg\Sigma E=18,259$), что более чем на три порядка превышает уровень события 12.07.1966 г. ($1000 \cdot 10^{12}$ Дж, $Lg\Sigma E=15,000$). Иных существенных (относительно фонового тренда) всплесков сейсмической активности, кроме 1927 и 1966 гг., за период инструментальных наблюдений в регионе зарегистрировано не было.

Учитывая колоссальную разницу (в несколько порядков) количества энергии, выделившейся в очагах землетрясений 1927 и 1966 годов, как относительно фонового тренда, так и между самими этими пароксизмальными событиями, допустимо предположить наличие в регионе *многоуровневой* сейсмической активности и, соответственно, цикличности ее проявления. Соотношение разных уровней этой цикличности можно отразить следующим образом: *низкий уровень* (краткопериодная цикличность в рамках фонового тренда с $K < 14$) → *средний уровень* (среднепериодная, в результате которой возникают землетрясения с $K = 15 \pm 1$; пример – всплеск активности в 1966 г.) → *высокий уровень* (длиннопериодная, которая проявляется в виде событий с $K \geq 17$, аналогичных Ялтинскому землетрясению 1927 г.). Определить точные временные рамки реализации всех этих уровней не представляется возможным, поскольку интервалы между экстремальными проявлениями сейсмической активности значительно превышают период проведения инструментальных сейсмических наблюдений.

Следует иметь в виду, что каталог землетрясений Крымско-Черноморского региона содержит сведения еще о 15-ти сильных исторических (доинструментального периода) событиях с $K \geq 14$, семь из которых произошло в западном сегменте региона, восемь – в его восточной части. Данные по некоторым из этих землетрясений (по Пантикапейскому 63 г. до н.э., по Херсонесскому 480 г. н.э. и др.) приведены в научной литературе [Бунэ, Медведева, 1990; Новый ..., 1977; Фирсов, 1976], хотя достоверность этих данных иногда подвергается сомнению историками, анализировавшими нарративные источники, где упоминались эти события [Хапаев, 2016]. Результаты археосейсмических исследований на территории Крыма (и особенно – на Керченском полуострове) установлены многочисленные случаи деформаций и разрушений древних построек, которые авторы соотносят с воздействием катастрофических исторических землетрясений [Клюкин, 1995; Овсяченко и др., 2017 и др.]. Эти данные свидетельствуют о наличии сильных исторических землетрясений в регионе, однако, в силу ряда неопределенностей, они не могут быть использованы для оценки временных параметров средне- и длиннопериодной цикличности сейсмического процесса.

Хронологическая последовательность и параметры пиковых значений сейсмической активности западного и восточного сегментов. Установлены различия в хронологической последовательности проявления всплесков (по сравнению с периодами относительного затишья) сейсмической активности в западном и восточном сегментах Крымско-Черноморского региона за время с 1950 по 2024 годы [Вольфман и др., 2025].

В пределах восточного сегмента на фоне длительных периодов средней и пониженной сейсмичности контрастно выделяются пять пиковых значений, отражающих всплески сейсмической активности разной интенсивности (рис. 4). Они приходятся на годы (в скобках – $\Sigma E \cdot 10^{12}$ в Дж): 1966 (1000,0), 1978 (16,1), 1990 (6,6), 2002 (10,0) и 2012 (1,3). В некоторых случаях затухание активности происходит не сразу, а в последующие 1–2 года (например, в 1990–1992 гг.), при этом сопутствующие всплески по своим параметрам значительно уступают основным максимумам.

Временной интервал между всплесками активности здесь составляет, как правило, 12 лет, а между 2002 и 2012 годами – 10 лет. Если учесть относительно повышенное количество выделившейся энергии в 1952 году ($\Sigma E = 1,0 \cdot 10^{12}$ Дж), то длительность интервалов между всеми максимумами характеризуется последовательностью: 14–12–12–12–10 лет. Следует отметить, что в эту периодичность вписывается и землетрясение 12.07.1966 года с $K = 15,0$, энергия которого на 2–3 порядка выше, чем у остальных максимумов. Таким образом, время подготовки всплесков сейсми-

ческой активности в пределах восточного сегмента Крымско-Черноморского региона составляет около 12 ± 2 лет. Вместе с тем, из этого временного ряда «выпадает» максимум 1972 года ($\Sigma E = 2,5 \cdot 10^{12}$ Дж), когда было отмечено повышенное количество выделившейся энергии и в пределах западного сегмента ($\Sigma E = 1,0 \cdot 10^{12}$ Дж). Это единственный случай за исследуемый период, когда относительное усиление сейсмической активности произошло практически одновременно в обоих сегментах региона.

В пределах западного сегмента региона всплески сейсмической активности менее интенсивны, чем в его восточной части. Даже при соотношениях масштабов 1:2 осей ординат ($\Sigma E \cdot 10^{12}$, Дж) на рисунке 4, они слабоконтрастны (за исключением 1957, 2008 и 2023 годов), но вполне идентифицируемы. Шесть наиболее выраженных из них приходятся на годы (в скобках – $\Sigma E \cdot 10^{12}$ в Дж): 1957 (5,3), 1972 (1,0), 1986 (0,9), 1998 (1,1), 2008 (5,0) и 2023 (3,3). Таким образом, временной ряд перерывов между этими максимумами представлен интервалами 15–14–12–10–15 лет. То есть, период подготовки максимальных проявлений сейсмической активности в западном сегменте приблизительно равен таковому в восточной части региона, составляя 13 ± 3 лет [Вольфман и др., 2025]. При этом пиковые значения в пределах одного сегмента приходятся на середину периодов относительного затишья в смежном сегменте и наоборот.

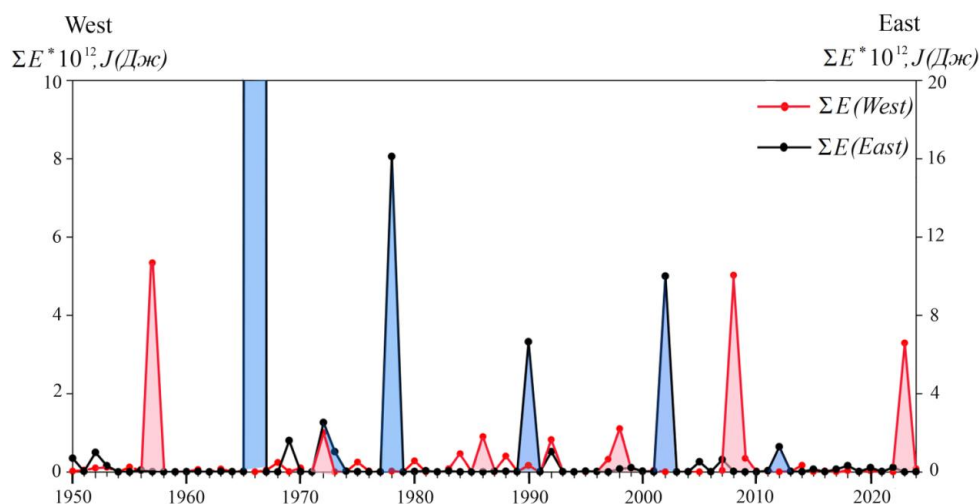


Рис. 4. Всплески сейсмической активности (суммарная энергия $\Sigma E \cdot 10^{12}$, Дж) в западном (красные, шкала West) и восточном (синие, шкала East) сегментах региона в период с 1950 по 2024 годы /

Fig. 4. Seismic activity bursts (total energy $\Sigma E \cdot 10^{12}$, J) in the western (red, West scale) and eastern (blue, East scale) segments of the region between 1950 and 2024

Экстраполируя приведенные ряды проявлений сейсмической активности (рис. 4) на будущее, можно предположить, что следующие сколько-нибудь значительные по интенсивности землетрясения могут реализоваться в 2025–2026 году – в пределах восточного сегмента, и несколько позднее, в 2035–2036 годах – в западном сегменте Крымско-Черноморского региона [Вольфман и др., 2025]. Данное предположение не является прогнозом в строгом смысле, но указывает на вероятность подобного сценария при условии сохранения вышеуказанных тенденций сейсмического процесса в регионе.

Выводы

Результаты исследования сейсмического режима Крымско-Черноморского региона показывают, что на протяжении 1950–2024 гг. здесь имели место всплески сейсмической активности с периодичностью около 12–13 лет. В западном и восточном

сегментах они происходили асинхронно: повышение сейсмичности в пределах одного сегмента приходилось приблизительно на середину периодов относительного затишья в смежном сегменте (и наоборот).

Следует добавить, что после поступления данной статьи в редакцию (во время ее доработки) в восточном сегменте Крымско-Черноморского региона произошло два относительно сильных землетрясения: 2 февраля 2026 г. в Азовском море ($K=12,3$, $M=4,5$) и 9 февраля 2026 г. – в районе г. Анапа ($K=12,2$, $M=4,4$). Суммарное количество сейсмической энергии, выделившейся в очагах этих землетрясений и 2-х афтершоков, последовавших через несколько часов после основных событий, составило $\Sigma E=3,581 \cdot 10^{12}$ Дж ($\lg \Sigma E=12,554$). При этом с момента последнего значимого землетрясения в этом районе (10 декабря 2012 г.; $K=12,1$) прошло 13 лет и 2 месяца. Таким образом, подтверждается ранее высказанное предположение о том, что в восточном сегменте Крымско-Черноморского региона относительный всплеск сейсмической активности может произойти в течение 2025–2026 года.

Литература

1. Бунэ В.И., Медведева Н.С. Оценка магнитуды землетрясения 63 г. до н.э. в Керченском проливе. // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1990. – № 3. – С. 61–63.
2. Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я., Бондарь М.Н. О различиях сейсмического режима западного и восточного сегментов Крымско-Черноморского региона. // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том XV / Науч. ред. Н.Б. Кузнецов, И.А. Керимов, В.А. Широкова, В.Б. Заалишвили. М.: ИИЕТ РАН. – 2025. – С. 255–259.
3. Глумов И.Ф., Маловицкий Я.П., Новиков А.А., Сенин Б.В. Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря. М.: Недра-Бизнесцентр, 2004. – 342 с.
4. Клюкин А.А. Сейсмодислокации Керченского полуострова. // Сейсмологический бюллетень Украины за 1992 г. – 1995. – С. 112–117.
5. Короновский Н.В., Демина Л.И. Коллизионный этап развития Кавказского сектора Альпийского складчатого пояса: геодинамика и магматизм. // Геотектоника. – 1999. – № 2. – С. 17–35.
6. Мониторинг сейсмических процессов в Крымско-Черноморском регионе. / Б.Г. Пустовитенко, А.В. Лушик, О.В. Боборыкина и др. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2014. – 264 с.
7. Никишин А.М., Ершов А.В. Латеральное разнообразие современных субдукционных систем на примере пояса Тетиса. // Вестник Московского ун-та. Серия 4. – 2004. – № 5. – С. 16–21.
8. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР (с древнейших времен до 1975 г.). М.: Наука, 1977. – С. 55–68.
9. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплексу карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах. / Гл. ред. В.И. Уломов, М.И. Богданов; сост.: В.И. Уломов, М.И. Богданов, В.Г. Трифонов и др. // Инженерные изыскания. – 2016. – № 7. – С. 49–121.
10. Овсяченко А.Н., Корженков А.М., Ларьков А.С., Мараханов А.Н., Рогожин Е.А. Новые сведения об очагах сильных землетрясений в районе Керченского полуострова по палеосейсмологическим данным. // Доклады академии наук. – 2017. – Т. 472. № 1. – С. 89–92. DOI: 10.7868/S0869565217010212.
11. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е. Об энергетической оценке землетрясений Крымско-Черноморского региона. // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. Т. 2. М.: Наука, 1974. – С. 113–125.
12. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е. Сейсмичность Черноморской впадины. // Геофизический журнал. – 1991. – Т. 13. № 1. – С. 14–19.
13. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Горячун А.В. Землетрясения Крымско-Черноморского региона. Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.
14. Пчелинцев В.Ф. Киммериды Крыма. М.-Л.: Наука, 1966. – 126 с.

15. Рогожин Е.А. Очерки региональной сейсмоструктуры. / Отв. ред. А.О. Глико. – М.: ИФЗ РАН, 2012. – 340 с.
16. Рогожин Е.А., Горбатилов А.В., Овсяченко А.Н. Активные разломы и глубинное строение зоны Керченского пролива. // Геология и геофизика Юга России. – 2015. – № 1. – С. 65–68.
17. Свалова В.Б., Заалишвили В.Б. Глубинная геодинамика и сейсмичность Кавказско-Анатолийского региона. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 77–89. DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006.
18. Сенин Б.В., Керимов В.Ю., Мустаев Р.Н., Леончик М.И. Структурно-геодинамические системы фундамента Черноморско-Каспийского региона и их эволюция в позднем палеозое-кайнозое. // Геотектоника. – 2022. – № 1. – С. 27–50.
19. Фирсов Л.В. Этюды радиоуглеродной хронологии Херсонеса Таврического. Новосибирск: Наука, 1976. – 222 с.
20. Хапаев В.В. Византийский Херсон на рубеже тысячелетий (вторая половина X – первая половина XI века). Симферополь: Н.Орианда, 2016. – 652 с.
21. Nikishin A., Ziegler P., Bolotov S., Fokin P. Late Paleozoic to Cenozoic Evolution of the Black Sea-Southern Eastern Europe Region: A view from the Russian Platform. // Turkish Journal of Earth Sciences. – 2011. – Vol. 20. – pp. 571–634.
22. Okay A., Nikishin A. Tectonic evolution of the southern margin of Laurasia in the Black Sea region. // International Geology Review. – 2015. – Vol. 57(5-8). – pp. 1051–1076.
23. Saintot A., Angelier J., Chorowicz J. Mechanical significance of structural patterns identified by remote sensing studies: a multiscale analysis of tectonic structures in Crimea. // Tectonophysics. – 1999. – Vol. 313. – pp. 187–218.
24. Stephenson R., Schellart W.P. The Black Sea back-arc basin: insights to its origin from geodynamic models of modern analogues. In: Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform. Eds. M. Sosson, N. Kaymakci, R.A. Stephenson, F. Bergerat, V. Starostenko. // Geological Society, London, Special Publications. – 2010. – Vol. 340. – pp. 11–21.
25. Zonenshain L.P., Le Pichon X. Deep basins of the Black Sea and Caspian Sea as remnants of Mesozoic back-arc basins. // Tectonophysics. – 1986. – Vol. 123. – pp. 181–211.

References

1. Bune V.I., Medvedeva N.S. Assessment of the magnitude for the earthquake of 63 BC in the Kerch Strait. Izvestiya Academi Nauki USSR. Physics of the Earth. 1990. No. 3. pp. 61–63. (In Russ.)
2. Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya., Bondar M.N. On the differences in the seismic regime of the Western and Eastern segments of the Crimean-Black Sea region. Modern Problems of Geology, Geophysics, and Geoecology in the North Caucasus. Vol. XV. Eds. N.B. Kuznetsov, I.A. Kerimov, V.A. Shirokova, V.B. Zaalishvili. Moscow. IIET RAS. 2025. pp. 255–259. (In Russ.)
3. 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-Business Center. 2004. 342 p. (In Russ.)
4. Klyukin A.A. Seismodislocations of the Kerch Peninsula. Seismological Bulletin of Ukraine for 1992. 1995. pp. 112–117. (In Russ.)
5. Koronovsky N.V., Demina L.I. Collisional Stage of the Caucasian Sector of the Alpine fold belt development: geodynamics and magmatism. Geotectonics. 1999. No. 2. pp. 17–35. (In Russ.)
6. Monitoring of Seismic Processes in the Crimean-Black Sea Region. Eds. B.G. Pustovitenko, A.V. Lushchik, O.V. Boborykina et al. Sevastopol. ECOSI Hydrophysics Research Center. 2014. 264 p. (In Russ.)
7. Nikishin A.M., Yershov A.V. Lateral diversity of modern subduction systems on the example of the Tethys belt. Bulletin of the Moscow University. Series 4. 2004. No. 5. pp. 16–21. (In Russ.)
8. A new catalog of strong earthquakes in the USSR (from ancient times to 1975). Moscow. Nauka. 1977. pp. 55–68. (In Russ.)
9. General seismic zoning of the territory of the Russian Federation. Explanatory note to the set of maps OSR-2016 and a list of settlements located in seismically active zones. Eds. V.I. Ulomov, M.I. Bogdanov; compilers: V.I. Ulomov, M.I. Bogdanov, V.G. Trifonov et al. Engineering Surveys. 2016. No. 7. pp. 49–121. (In Russ.)

10. Ovsuchenko A. N., Korzhenkov A.M., Larkov A.S., Marakhanov A.N., Rogozhin E.A. New findings on the sources of strong earthquakes in Kerch Peninsula based on paleoseismological data. *Doklady Earth Sciences*. 2017. Vol. 472. No. 1. pp. 89–92. DOI: 10.7868/S0869565217010212. (In Russ.)
11. Pustovitenko B.G., Kulchitsky V.E. On the Energy Assessment of Earthquakes in the Crimean-Black Sea Region. *Magnitude and Energy Classification of Earthquakes*. Vol. 2. Moscow. Nauka. 1974. pp. 113–125. (In Russ.)
12. Pustovitenko B.G., Kulchitsky V.E. Seismicity of the Black Sea Trench. *Geophysical Journal*. 1991. Vol. 13. No. 1. pp. 14–19. (In Russ.)
13. Pustovitenko B.G., Kulchitsky V.E., Goryachun A.V. Earthquakes in the Crimean-Black Sea region. *Kiev. Naukova Dumka*. 1989. 192 p. (In Russ.)
14. Pchelintsev V.F. *Kimmerids of the Crimea*. Moscow-Leningrad. Nauka. 1966. 126 p. (In Russ.)
15. Rogozhin E.A. *Essays on Regional Seismotectonics*. Ed. A.O. Gliko. Moscow. IPE RAS. 2012. 340 p. (In Russ.)
16. Rogozhin E.A., Gorbatiykov A.V., Ovsyuchenko A.N. Active faults and the deep structure of the Kerch strait zone. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2015. No. 1. pp. 65–68. (In Russ.)
17. Svalova V.B., Zaalishvili V.B. Deep geodynamics and seismicity of the Caucasus-Anatolia region. *Geology and Geophysics Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 77–89. DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006. (In Russ.)
18. Senin B.V., Kerimov V.Yu., Mustaev R.N., Leontchik M.I. Structural and geodynamic systems of the Black Sea-Caspian region foundation and their evolution in the late Paleozoic-Cenozoic. *Geotectonics*. 2022. No. 1. pp. 27–50. (In Russ.)
19. Firsov L.V. *Etudes of the radiocarbon chronology of Tauric Chersonesos*. Novosibirsk. Nauka. 1976. 222 p. (In Russ.)
20. Khapaev V.V. Byzantine Chersonesos at the turn of the millennium (second half of the 10th – first half of the 11th century). *Simferopol. N.Orianda*. 2016. 652 p. (In Russ.)
21. Nikishin A., Ziegler P., Bolotov S., Fokin P. Late Paleozoic to Cenozoic Evolution of the Black Sea-Southern Eastern Europe Region: A View from the Russian Platform. *Turkish Journal of Earth Sciences*. 2011. Vol. 20. pp. 571–634.
22. Okay A., Nikishin A. Tectonic evolution of the southern margin of Laurasia in the Black Sea region. *International Geology Review*. 2015. Vol. 57(5-8). pp. 1051–1076.
23. Saintot A., Angelier J., Chorowicz J. Mechanical significance of structural patterns identified by remote sensing studies: a multiscale analysis of tectonic structures in Crimea. *Tectonophysics*. 1999. Vol. 313. pp. 187–218.
24. Stephenson R., Schellart W.P. The Black Sea back-arc basin: insights to its origin from geodynamic models of modern analogues. In: *Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform*. Eds. M. Sosson, N. Kaymakci, R.A. Stephenson, F. Bergerat, V. Starostenko. Geological Society, London, Special Publications. 2010. Vol. 340. pp. 11–21.
25. Zonenshain L.P., Le Pichon X. Deep basins of the Black Sea and Caspian Sea as remnants of Mesozoic back-arc basins. *Tectonophysics*. 1986. Vol. 123. pp. 181–211.

УДК 550.34: 550.34.06.013.3

DOI: 10.46698/VNC.2026.10.69.002

Оригинальная статья

Особенности структуры и динамики развития афтершоковой зоны Спитакского землетрясения 1988 г. (за период 1988–2024 гг.)

С.Н. Назаретян¹, Р.А. Арутюнян², Г.А. Игитян³, А.А. Казарян²

¹ Территориальная служба сейсмической защиты МВД РА, Республика Армения,
0082, г. Ереван, Цицернакабердское шоссе 8/1,
e-mail: snaznssp@mail.ru;

² Институт геологических наук НАН РА, Республика Армения, 0019,
г. Ереван, ул. Баграмяна, 22;

³ Национальный политехнический университет Армении, Республика Армения,
0019, г. Ереван, ул. Теряна, 105

Статья поступила: 14.10.2025, доработана: 04.03.2026, принята к публикации: 09.03.2026

Резюме: Актуальность работы обусловлена важностью установления особенностей строения афтершоковой зоны и динамики ее развития за большой период времени, а также небольшим количеством исследований афтершокового процесса крупных землетрясений за длительный период времени. **Основная цель** – изучение особенностей внутренней структуры афтершоковой зоны Спитакского землетрясения 1988 г. и ее динамики на основе данных за более чем 35 лет. **Объектом исследования** является афтершоковая зона разрушительного Спитакского землетрясения 1988 г. **Методы исследования** опираются на изучение генезиса афтершоков, связанных с основным событием землетрясения и образовавшимися поверхностными региональными разломами. **Результаты исследования.** Установлено, что процесс возникновения афтершоков продолжается по настоящее время. Показано, что афтершоковая зона, с площадью около 600 км², состоит из 4 отдельных сегментов. При сегментации области использован комплекс данных (параметры образованных на земной поверхности тектонических структур, пространственно-временного распределения афтершоков, мультиплетного характера основного события, детальных макросейсмических исследований и др.). Выявлены особенности строения и динамики развития отдельных сегментов. Предполагается, что в сегменте, соответствующем наиболее слабому и поверхностному толчку основного события, с 2003 г. афтершоковая активность прекратилась.

Ключевые слова: землетрясение, зона афтершоков, сегмент, динамика развития.

Благодарности: Данное исследование профинансировано правительством Республики Армения в рамках долгосрочной государственной программы по снижению сейсмического риска территории РА и Комитетом по высшему образованию и науке Министерства образования, науки, культуры и спорта РА (научный проект № 25РГ-13115). Авторы статьи выражают свою благодарность правительству РА и Комитету.

Для цитирования: Назаретян С.Н., Арутюнян Р.А., Игитян Г.А., Казарян А.А. Особенности структуры и динамики развития афтершоковой зоны Спитакского землетрясения 1988 г. (за период 1988–2024 гг.). *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 33–43. DOI: 10.46698/VNC.2026.10.69.002

DOI: 10.46698/VNC.2026.10.69.002

Original paper

Features of the structure and development dynamics of the aftershock zone of the 1988 Spitak earthquake (for the period 1988–2024)

S.N. Nazaretyan¹, R.A. Haroutiunian², H.A. Igityan³, A.A. Kazarian²

¹ Territorial Surcey for Seismic Protection, Ministry of Internal Affairs of the Republic of Armenia, 8/1 Tsitsernakaberd Highway, Yerevan 0082, Republic of Armenia, e-mail: snaznssp@mail.ru;

² Institute of Geological Sciences, National Academy of Sciences of the Republic of Armenia, 22 Baghramyan Str., Yerevan 0019, Republic of Armenia;

³ National Polytechnic University of Armenia, 105 Teryan Str., Yerevan 0019, Republic of Armenia

Received: 14.10.2025, revised: 04.03.2026, accepted: 09.03.2026

Abstract: The relevance of this work is due to the importance of establishing the structural features of the aftershock zone and the dynamics of its development over a long period of time, as well as the limited number of studies on the aftershock process of large earthquakes over a long period of time. **The aim** is to study the internal structure of the aftershock zone of the 1988 Spitak earthquake and its dynamics based on data spanning more than 35 years. **The object** of the study is the aftershock zone of the devastating 1988 Spitak earthquake. **Methods.** The research methods are based on the study of the genesis of aftershocks associated with the main earthquake event and the resulting surface regional faults. **Results.** It has been established that the process of aftershocks continues to the present day. It has been shown that the aftershock zone, with an area of about 600 km², consists of four separate segments. A complex of data was used to segment the area (parameters of tectonic structures formed on the Earth's surface, spatio-temporal distribution of aftershocks, multiple nature of the main event, detailed macroseismic studies, etc.). The structural features and dynamics of development of individual segments were identified. It is assumed that in the segment corresponding to the weakest and shallowest shock of the main event, aftershock activity has ceased since 2003.

Keywords: earthquake, aftershock zone, segment, development dynamics.

Acknowledgments: This study was funded by the Government of the Republic of Armenia as part of a long-term state program to reduce seismic risk in the territory of the Republic of Armenia, and by the Committee on Higher Education and Science of the Ministry of Education, Science, Culture, and Sports of the Republic of Armenia (research project No. 25RG-1E115). The authors of the article express their gratitude to the Government of the Republic of Armenia and the Committee.

For citation: Nazaretyan S.N., Haroutiunian R.A., Igityan H.A., Kazarian A.A. Features of the structure and development dynamics of the aftershock zone of the 1988 Spitak earthquake (for the period 1988–2024). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 33–43. DOI: 10.46698/VNC.2026.10.69.002

Введение

Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 г. ($\varphi=40,90$; $\lambda=44,20$, $M=7,0$, глубина гипоцентра – 10 км, продолжительность основного события – 35–40 сек.) является одним из наиболее многосторонне и детально изученных землетрясений мира [Хачиян, 2018]. Его изучением занимались специалисты СССР и 42 стран (<https://data.opendata.am/dataset/the-spitak-earthquake>) [Назаретян, 2013].

В частности, были определены основные параметры афтершоков, установлены важные элементы строения афтершоковой области и выявлены особенности процесса развития зоны за первые 3 года (07.12.1988 – 01.01.1992) (<https://data.opendata.am/dataset/the-spitak-earthquake>) [Cisternas et al., 1989; Арефьев и др., 1991; Dorbath et al., 1992; Haessler et al., 1992; Арефьев, 2003; Мирзоян, Назаретян, 2008]. Специалистам удалось рассмотреть основное событие землетрясения как геологический процесс, развивающийся во времени и в пространстве. Надо отметить, что исследований афтершокового процесса крупных землетрясений за длительный период времени крайне мало. В данной работе сделана попытка дополнить эти исследования данными за последние 35 лет, пересмотреть некоторые результаты о строении афтершоковой зоны исходя из современных представлений, рассмотреть динамику развития отдельных элементов внутреннего строения и др. Этим и обусловлена **актуальность** проделанной работы.

Основной целью данной статьи является уточнение особенностей внутренней структуры афтершоковой зоны Спитакского землетрясения 1988 г. и изучение ее динамики (пространственно-временного развития) за последние 35 лет.

Основные задачи:

- Составление уточненной структуры внутреннего строения афтершоковой зоны (сегментация) на основе характеристик основного события, пространственно-временного распределения афтершоков, механизма их очагов и образованных на земной поверхности крупных геологических структур;
- Выявление основных закономерностей динамики развития афтершоковой зоны в высокоактивный (1988–1991 гг.), и особенно в слабоактивный (1992 – по настоящее время) периоды;
- Установление особенностей динамики развития афтершоков в отдельных сегментах афтершоковой зоны в слабоактивный период;
- Выявление закономерностей появления сильных афтершоков.

Материалы и методы исследований

После Спитакского землетрясения 1988 г. специалистами СССР, США и Франции было установлено 30–40 временных сейсмических станций, в основном в эпицентральной зоне, для регистрации афтершоков. Это позволило до 1992 г. определять координаты эпицентров афтершоков с точностью ± 1 км, а глубину гипоцентров – до ± 3 км (<https://data.opendata.am/dataset/the-spitak-earthquake>) [Results and data ..., 1989]. На основе этих данных были выявлены важные особенности структуры афтершоковой зоны и изучена динамика её развития в течение первых 3 лет после землетрясения [Cisternas et al., 1989; Арефьев и др., 1991; Dorbath et al., 1992; Арефьев, 2003]. После демонтажа временных сейсмических станций в 1992 г., точность определения параметров афтершоков до 1996 г. снизилась. Однако, после создания Национальной службой сейсмической защиты (НССЗ) РА сети из 12 телеметрических станций, задача надежного определения параметров афтершоков была решена (табл. 1). До января 2025 г. всего было зарегистрировано около 14 000 афтершоков.

Таблица 1 / Table 1

**Точность оценок параметров афтершоков Спитакского землетрясения
1988 г. за разные периоды /
Accuracy of estimates of aftershock parameters of the 1988
Spitak earthquake for different periods**

Параметр / Parameter	Точность оценок за разные периоды / Accuracy of estimates for different periods			
	1988- 1991	1992- 1995	1996- 2017	2018- 2024
Точность координат эпицентра, км / Epicenter coordinate accuracy, km	±1	±5	±3	±3
Минимальный порог магнитуды / Minimum magnitude threshold	≥ 1,0	≥ 2,5	≥ 2.0	≥ 2.0
Точность глубины гипоцентра, км / Hypocenter depth accuracy, km	±3	±8	±5	±5

Методы, используемые нами для выделения структурных единиц афтершоковой зоны (сегментация) и изучения динамики их развития по сегментам, основаны на генезисе афтершоков. Афтершоки по происхождению тесно связаны с основным событием Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г. и образованным региональным разломом. Известно, что основное событие имеет многоактный (мультиплетный) характер [Cisternas et al., 1989; Haessler et al., 1992; Dorbath et al., 1992; Арефьев, 2003; Мирзоян, Назаретян, 2008], т.е. оно состояло из нескольких сильных сотрясений с разными параметрами (время, расположение в пространстве, магнитуда и др.). Вследствие этих отдельных сотрясений на земной поверхности образовался региональный разлом (взбросо-сдвиг) общей длиной 37 км и крупные сейсмогравитационные структуры объёмом горных масс в несколько млн м³ (кубометров). Взбросо-сдвиг состоит из двух основных фрагментов длиной 11 км (у г. Спитак) и 10 км (у с. Алавар) и тектонических элементов, свидетельствующих о наличии разломов на глубине. Максимальная вертикальная амплитуда разломов достигает до 2 м, а горизонтальная – 1 м. Наклон зоны разлома составляет 60°–80°, с падением на северо-восток [Karakhanyan et al., 2017]. На северо-западном продолжении разлома у с. Дзорашен были образованы две крупные сейсмогравитационные структуры объёмом горных масс более 2 млн м³, в формировании которых вода не участвовала (рис. 1). Эти два важных параметра, образованных тектонических структур (продолжение разлома на северо-запад и сейсмогравитационные структуры), позволяют нам предположить, что они являются следствием сотрясений Спитакского землетрясения интенсивностью 10 баллов по MSK-64, установленных по макросейсмическим данным [Назаретян, 2013].

Работа выполнена также на основе известных методов сбора и статистической обработки данных. Широко использованы данные «Сводного каталога землетрясений на территории Республики Армения и сопредельных регионов» (Фонд НССЗ РА, 2024), а также макросейсмические данные по Спитакскому землетрясению 1988 г. и результаты полевых исследований тектонических структур, опубликованные в монографии (<https://data.opendata.am/dataset/the-spitak-earthquake>) [Results and data ..., 1989; Назаретян, 2013].

Результаты исследований

Расположение отдельных толчков основного события Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г.

Исследователи Спитакского землетрясения 1988 г. считают, что основное событие 7 декабря состоит из 2–14 сильных толчков с различными параметрами [Cisternas et al., 1989; Dorbath et al., 1992; Арефьев, 2003; Мирзоян, Назаретян, 2008; Karakhanyan et al., 2017]. Наши комплексные исследования, основанные на анализе сейсмограмм, расположения образованных крупных сейсмогенных структур, макросейсмических данных, в том числе восприятия толчков основного события людьми в зонах различной интенсивности, параметров афтершоков и др., показали, что наиболее четко выделяются 3 отдельных толчка с интервалами между ними 5 и 14 секунд. На рисунке 1 представлено положение проекций очагов этих трех толчков с указанием последовательности их появления. Все они расположены вдоль образованного на земной поверхности регионального разлома. Первый толчок землетрясения произошёл под г. Спитак, имел магнитуду 6,8–7,0 и глубину гипоцентра около 10 км [Хачиян, 2018]. Население города почувствовало внезапный вертикальный удар, вследствие которого была разрушена подавляющая часть зданий. В г. Гюмри, находящемся на расстоянии 36 км от эпицентра, вследствие этого толчка были небольшие разрушения. После первого толчка, через 5 секунд, произошёл второй, наиболее слабый и поверхностный (глубина около 5 км) толчок у с. Алавар. Он стал причиной разрушений в близлежащих селах. Третий, самый сильный ($M=7.0$) и глубокий (10–15 км) толчок произошёл у с. Дзорашен с интенсивностью 10 баллов. Вследствие этого третьего толчка 60 % территории г. Гюмри, находящегося на расстоянии 25 км от эпицентра этого толчка, было разрушено (погибло 17 000 человек), а средняя интенсивность колебаний в городе составляла 9 баллов. Этим объясняется интересующий население вопрос, почему г. Гюмри, находящийся на расстоянии 36 км от официального эпицентра Спитакского землетрясения 1988 г., был сильно разрушен, а г. Ванадзор, отстоящий от Спитака на расстояние 10 км, пострадал значительно меньше.

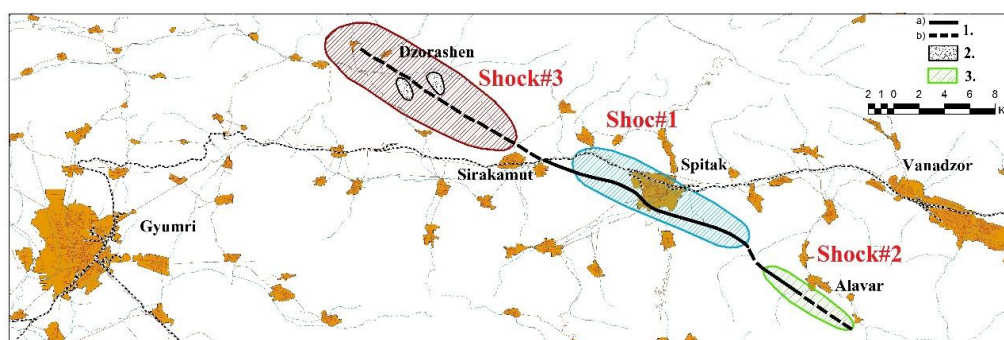


Рис. 1. Схема расположения проекций очагов трех отдельных толчков основного события 7 декабря 1988 г. Спитакского землетрясения и крупных сейсмогенных структур (разлома и сейсмогравитационных дислокаций): 1. Главный поверхностный разлом (пунктирными линиями обозначено предполагаемое расположение разлома); 2. Крупные сейсмогравитационные образования; 3. Проекция очагов отдельных толчков главного события. Размеры проекций очагов определены приблизительно на основе их магнитуды [Nazaretyan, 2018] /

Fig. 1. Schematic map of the location of the projections of the foci of three individual shocks of the main event of 7 December 1988 Spitak earthquake, and large seismogenic structures (fault and seismogravitational dislocations): 1. Main surface fault (dashed lines indicate suspected fault); 2. Large seismogravitational formations; 3. Projections of the foci of individual shocks of the main event. The sizes of the projections of the foci are determined approximately on the basis of their magnitude [Nazaretyan, 2018]

Специалистами на основе пространственно-временного распределения афтершоков за 1988–1991 гг., а также геологических данных были составлены разные схемы строения афтершоковой зоны Спитакского землетрясения 1988 г. [Cisternas et al., 1989; Dorbath et al., 1992; Ребецкий и др., 2000; Арефьев, 2003; Мирзоян, Назаретян, 2008]. По этим схемам имеются разногласия по следующим основным вопросам: определение границ афтершоковой зоны; деление зоны на подзоны (сегменты); связь афтершоковой зоны с сейсмоактивной зоной Джавахетского нагорья. Если разногласия между специалистами в определении границ афтершоковой зоны незначительны и обособленность (изолированность) афтершоковой зоны от сейсмоактивного Джавахетского вулканического нагорья становится очевидной при рассмотрении карт сейсмичности до Спитакского землетрясения 1988 г. (очевидно, ее существование имело место и до Спитакского землетрясения и имеет иной генезис [Sahakyan, 2018]), то вопрос о внутренней структуре афтершоковой зоны является дискуссионным. Наиболее близка к составленной нами схеме сегментов (рис. 2) схема, представленная в работе [Dorbath et al., 1992]. В указанной статье впервые на основе тектонических особенностей (поверхностного разрыва, оси антиклинали, непрерывного надвига) и распределения эпицентров афтершоков за 20.12.1988–08.01.1989 гг. была создана схема сегментации афтершоковой зоны, на которой выделено 5 сегментов.

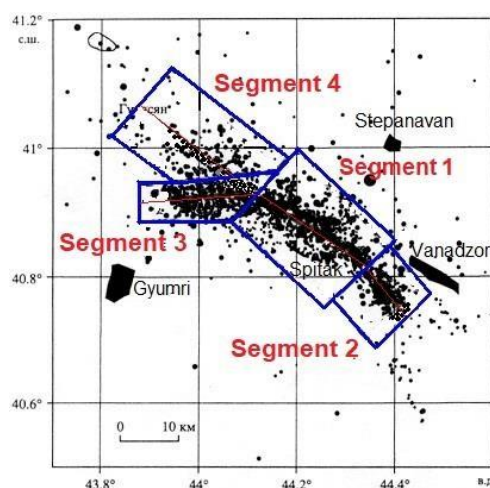


Рис. 2. Карта распределения эпицентров афтершоков Спитакского землетрясения 1988 г. за период 09.12.1988–01.01.2025 с $M \geq 1.0$ и сегментов афтершоковой зоны /

Fig. 2. Map of the distribution of aftershock epicenters of the 1988 Spitak earthquake for the period 09.12.1988–01.01.2025 with $M \geq 1.0$ and aftershock zone segments

Согласно предложенной нами схеме (рис. 2), протяжённость афтершоковой зоны составляет до 60 км, ширина – около 8–10 км, а площадь – около 600 км². Выделенные нами 4 сегмента афтершоков отличаются друг от друга как по основным параметрам, так и по механизмам очага. Использование основных параметров механизма очага при сегментации важно, поскольку учитываются тектонические напряжения [Ребецкий и др., 2023; Овсюченко и др., 2024]. Согласно [Ребецкий и др., 2000; Арефьев, 2003] в сегменте 1 преобладают афтершоки со сбросами и сдвигами, в сегменте 2 – сдвиги, а в сегментах 3 и 4 количество сбросов и сдвигов примерно одинаково.

Некоторые особенности динамики развития афтершоковой зоны Спитакского землетрясения 1988 г. по данным за 35 лет

Афтершоковая активность Спитакского землетрясения 1988 г. продолжается по настоящее время (01.01.2025 г.). Не было временного периода длительностью 6 ме-

сяцев, чтобы в афтершоковой зоне не происходил хотя бы один слабый толчок. До землетрясения на этой территории годами не было даже слабых толчков. Весь период афтершоков мы делим на две части: **высокоактивный** (12.07.1988 – 01.01.1992) и **слабоактивный** (01.01.1992 – по настоящее время). На основе карты сейсмоактивных региональных разломов и эпицентров афтершоков с $M \geq 2.5$ за последние 7 лет (рис. 3) установлены две важные закономерности появления афтершоков в сегментах. Заметно, что эпицентр основного события (первый толчок) расположен в сегменте 1, где пересекаются сейсмоактивные региональные разломы северо-западного и субширотного простирания, т.е. землетрясение началось в тектонически активном разломном узле. Наиболее сильные афтершоки с магнитудой 4,1–5,0 произошли именно в этом сегменте. Начиная с 2003 г. в сегменте 2, в отличие от остальных трех сегментов, афтершоки отсутствуют.

Основные особенности динамики в высокоактивный афтершоковый период

Основные особенности (характеристики) **высокоактивного** афтершокового периода были установлены многими специалистами [Cisternas et al., 1989; Dorbath et al., 1992; Мирзоян, Назаретян, 2008]. Поэтому в настоящей работе целесообразно привести только наиболее важные количественные характеристики, такие как: а) во всей афтершоковой зоне за этот период произошло 92 % от общего числа афтершоков (около 13 700); б) основная часть общей энергии афтершоков (98 %) выделилась в период высокой активности; в) первый сильный афтершок произошел примерно через 4 минуты после основного события [Cisternas et al., 1989; Dorbath et al., 1992; Арефьев, 2003; Баранов и др., 2019].

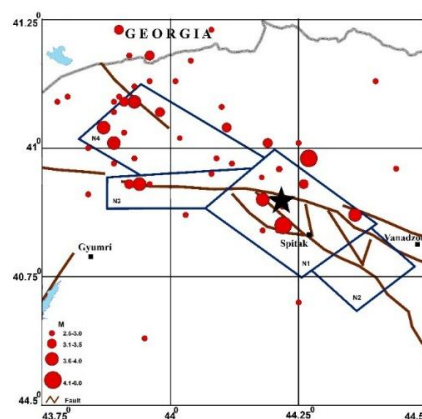


Рис. 3. Карта региональных разломов (Armenia: Probabilistic Seismic Hazard Assessment (scale 1:500,000). 2023. <https://data.opendata.am/dataset/sustc-979>), 4 сегмента афтершоковой зоны Спитакского землетрясения 1988 г. и эпицентры землетрясений с $M \geq 2.5$ за 01.01.2018–01.01.2025. На карте эпицентр Спитакского землетрясения 07.12.1988 г. обозначен звездочкой /

Fig. 3. Map of regional faults (Armenia: Probabilistic Seismic Hazard Assessment (scale 1:500,000). 2023. <https://data.opendata.am/dataset/sustc-979>), 4 segments of the aftershock zone of the 1988 Spitak earthquake and epicenters of earthquakes with $M \geq 2.5$ for 01.01.2018–01.01.2025. On the map, the epicenter of the Spitak earthquake of 12.07.1988 is marked with a star

Основные особенности динамики в слабоактивный афтершоковый период

В слабоактивный период развития афтершоковой зоны наблюдаются следующие закономерности:

- Предполагается, что прекратился афтершоковый процесс в сегменте 2, который соответствует наиболее слабому и поверхностному толчку основного события начиная с 2003 г., т.к. с этого года здесь отсутствуют афтершоки даже с магнитудой до 2.0 (рис. 3);

- В период 1997–2005 гг. наблюдалась определённая активизация всей афтершоковой зоны, т.е. во всех четырёх сегментах увеличилось как количество афтершоков, так и выделившаяся энергия (рис. 4). Подавляющее большинство афтершоков имеют магнитуду 1,7–3,0;
- Какой-либо закономерности проявления сильных афтершоков ($M \geq 4.0$) не наблюдается.

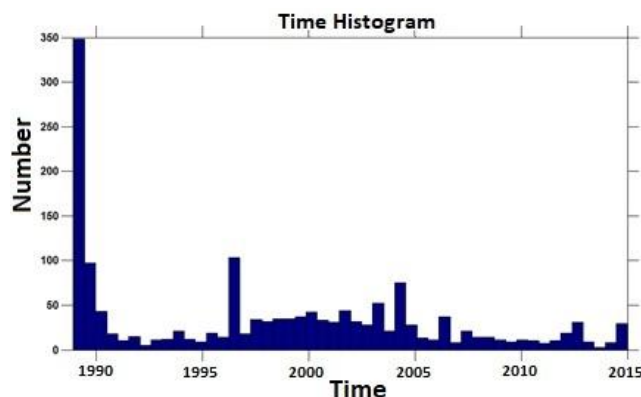


Рис. 4. Распределение около 14 000 афтершоков Спитакского землетрясения 1988 г. по годам. Большинство афтершоков произошло в первые три года после землетрясения. Появление афтершоков продолжается и по сей день. Они имеют магнитуду $1.0 \leq M \leq 5.0$ /

Fig. 4. Distribution of about 14,000 aftershocks of the 1988 Spitak earthquake by year. Most of the aftershocks occurred in the first three years after the earthquake. Aftershocks continue to occur to this day. They have a magnitude of $1.0 \leq M \leq 5.0$

Обсуждение

Во введении данной статьи была отмечена важность проведенных научных исследований для распознавания афтершокового процесса. Наряду с этим, нами сделана попытка рассмотреть ответы на ряд практических вопросов, которые, в первую очередь, интересуют население зоны бедствия. Например: произойдет ли новое мощное землетрясение в очаговой зоне или сильный афтершок, какова продолжительность афтершокового периода, через сколько лет произойдет такое же сильное землетрясение и т.д.? И это естественно, поскольку продолжать жить в зоне разрушений, если существует вероятность нового землетрясения, – вопрос качества жизни. К сожалению, ответы на такие вопросы весьма сложны, а если говорить честно, четких ответов пока нет. Для ответа на такие вопросы необходимо понимать сущность и особенности 4-х основных этапов **полного цикла сильного землетрясения**: (1) подготовка землетрясения и форшоки; (2) основное событие; (3) афтершоковый процесс; (4) «залечивание» среды очаговой зоны. Попытки специалистов решить эти задачи теоретическими расчетами или путем моделирования процессов пока малоэффективны, поскольку отсутствуют надежные данные о физико-механических, реологических и других свойствах среды подготовки сильных землетрясений, о тектонических напряжениях и т.д. [Баранов и др., 2019; Овсяченко и др., 2023; Заалишвили и др., 2025]. Для этой цели относительно эффективным является использование статистических данных о детально и многосторонне изученных землетрясениях. Полученные в данной статье результаты относятся ко 2 и 3 этапам полного цикла землетрясений. Необходимо учитывать, что Спитакское землетрясение 1988 г. произошло в зоне столкновения (коллизии) Аравийской и Евразийской плит [Karakhanyan et al., 2017], характеризующейся особенностью сейсмичности и сложностью [Koper et al., 2018]. Но, несмотря на это, некоторые результаты, полученные в данной работе, представляют определенный интерес для прикладной сейсмологии. К ним относятся: а) не менее

35 лет длительности афтершокового процесса Спитакского землетрясения 1988 г. с магнитудой 7.0 и глубиной гипоцентра 5–15 км; **б)** важность учета мультиплетности основного события и образованных на земной поверхности крупных геологических структур в формировании афтершоков и сегментации афтершоковой зоны; **в)** отсутствие закономерностей в появлении сильных афтершоков; **г)** объяснение разрушений населенных пунктов, расположенных достаточно далеко от официального эпицентра основного события, вследствие миграции его отдельных толчков, **д)** предположение об относительно быстром прекращении афтершоковой активности в секторах, связанных с неглубоким и слабым толчком основного события землетрясения. По нашему мнению, наиболее перспективные направления будущих исследований данной области связаны именно с этими вопросами.

Выводы

Исследования афтершоковой зоны Спитакского землетрясения 1988 г. на основе данных за последние 35 лет позволили сделать следующие выводы:

- Сложное строение афтершоковой зоны обусловлено отдельными толчками основного события и образованными на земной поверхности региональными геологическими структурами. Наиболее обосновано выделение 4-х сегментов афтершоковой зоны с разными параметрами афтершоков;
- Афтершоковая активность продолжается по настоящее время (01.01.2025). Преобладающее количество афтершоков и большая часть общей энергии выделились в высокоактивный период;
- Сейсмическая активизация наблюдалась во всех секторах афтершоковой зоны в 1997–2005 гг., что говорит о возможной некоторой активизации афтершокового процесса в слабоактивный период;
- На общем фоне затухания количества афтершоков какой-либо определенной закономерности проявления сильных афтершоков ($M \geq 4,0$) не наблюдается;
- Предполагается, что в сегменте 2 афтершоковой зоны, который соответствует самому слабому и неглубокому толчку основного события, процесс образования афтершоков завершился в 2003 г.

Литература

1. Арефьев С.С. Эпицентральные сейсмологические исследования. М.: ИКЦ Академкнига, 2003. – 375 с.
2. Арефьев С.С., Аптекман Ж.Я., Госбатова И.П., Геодакян Э.Г. Каталог афтершоков Спитакского землетрясения 1988 г. // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1991. – № 11. – С. 7–14.
3. Баранов С.В., Шебалин П.Н., Габсатарова И.П. Связь вероятности возникновения сильного афтершока с сейсмичностью, предшествующей основному толчку. // Геофизические исследования. – 2019. – Т. 20. № 3. – С. 5–22. DOI: 10.21455/gr2019.3-1.
4. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И. Геоэкологические аспекты инженерной сейсмологии. Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН, 2025. – 216 с.
5. Мирзоян Л.Б., Назаретян С.Н. Особенности строения и динамики развития афтершоковой зоны Спитакского землетрясения 1988 г. // Известия НАН РА. Науки о Земле. – 2008. – Т. LXI. № 1. – С. 32–38.
6. Назаретян С.Н. Сейсмическая опасность и риски территорий городов зоны Спитакского землетрясения 1988 г. / Под ред. С.С. Дарбиняна. – Ереван: Гитутюн, – 2013. 212 с.
7. Овсюченко А.Н., Едемский Д.Е., Нечаев С.Ю., Корженков А.М., Заалишвили В.Б., Ларьков А.С., Аверин А.А. Исследования очагов сильных исторических землетрясений методами геофизики, палео-, архео- и исторической сейсмологии: Фиагдонская котловина в Северной Осетии. // Геология и Геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 1. – С. 64–89. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.37.005.

8. Овсянченко А.Н., Ларьков А.С., Андреева Н.В., Лукашова Р.Н. Сейсмоструктура очагов сильных землетрясений Кавказа: итоги исследований Евгения Александровича Рогожина. // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5. № 3. – С. 28–44. DOI: 10.35540/2686-7907.2023.3.02.
9. Ребецкий Ю.Л., Арефьев С.С., Никитина Е.С. Мониторинг напряженного состояния афтершоковой области Спитакского землетрясения. // Доклады Академии наук. – 2000. – Т. 375. № 2. – С. 239–244.
10. Ребецкий Ю.Л., Добрынина А.А., Саньков В.А. Современное напряженное состояние и геодинамика Байкальской рифтовой системы. // Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64. № 1. – С. 87–111. DOI: 10.15372/GiG2022110.
11. Хачиян Э.Е. Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 года: основные сейсмологические характеристики и анализ его разрушительных последствий. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2018. – № 4. – С. 9–30.
12. Cisternas A., Philip H., Arefiev S.S., Bousquet J.C. et al. The Spitak (Armenia) earthquake of 7 December 1988: Field observations, seismology and tectonics. // Nature. – 1989. – Vol. 339. No. 6227. – pp. 675–679. DOI: 10.1038/339675a0.
13. Dorbath L., Dorbath C., Rivera L., Fuenzalida A., Cisternas A., Tatevossian R., Aptekman J., Arefiev S. Geometry, segmentation and stress regime of the Spitak (Armenia) earthquake from the analysis of the aftershock sequence. // Geophysical Journal International. – 1992. – Vol. 108. – pp. 309–328.
14. Haessler H., Deschamps A., Dufumier H., Fuenzalida H., Cisternas A. The rupture process of the Armenian earthquake from broad-band teleseismic body wave records. // Geophysics. – 1992. – Vol. 109. Issue 1. – pp. 151–161.
15. Karakhanyan A., Arakelyan A., Avagyan A., Sadoyan T. Aspects of the seismotectonics of Armenia: New data and reanalysis. Tectonic Evolution, collision, and seismicity of Southwest Asia: In honor of Manuel Berberian's forty years of research contributions. // Geological Society of America. – 2017. – Vol. 525. – pp. 445–477. DOI: 10.1130/2016.2525(14).
16. Koper K.D., Pankow K.L., Pechmann J.C., Hale J.M., Burlacu R., Yeck W.L., Benz H.M. et al. Afterslip enhanced aftershock activity during the 2017 earthquake sequence Near Sulphur Peak, Idaho. // Geophysical Research Letters. – 2018. – pp. 5352–5361. DOI: 10.1029/2018GL078196.
17. Nazaretyan S. The 1988 Spitak earthquake in photos, facts and comments. Republic of Armenia: Gitutyun, – 2018. 140 p.
18. Results and data from seismological and geological studies of the earthquakes of December 7, 1988, near Spitak, Armenia SSR. Vol. 1. / Ed. R.D. Borchardt. – California: United States Department of the Interior. Geological Survey, – 1989. 189 p. DOI: 10.3133/ofr89163A.
19. Sahakyan E.E. The features of stress field in the Javakheti volcanic highland determined the earthquake focal mechanisms for the time period 2005–2017. // Proceedings of the NAS RA. Earth Sciences. – 2018. – No. 2. – pp. 38–51.

References

1. Arefiev S.S. Epicentral seismological studies. Moscow. Akademkniga. 2003. 375 p. (In Russ.)
2. Arefiev S.S., Aptekman Zh.Ya., Gosbatova I.P., Geodakyan E.G. Catalog of aftershocks of the 1988 Spitak earthquake. Izvestiya Akademii Nauk USSR. Physics of the Solid Earth. 1991. No. 11. pp. 7–14. (In Russ.)
3. Baranov S.V., Shebalin P.N., Gabsatova I.P. Relationship between the probability of a strong aftershock and seismicity preceding the main shock. Geophysical Research. 2019. Vol. 20. No. 3. pp. 5–22. DOI: 10.21455/gr2019.3-1. (In Russ.)
4. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I. Geoecological aspects of engineering seismology. Vladikavkaz. GPI VSC RAS. 2025. 216 p. (In Russ.)
5. Mirzoyan L.B., Nazaretyan S.N. Features of the structure and dynamics of the development of the aftershock zone of the 1988 Spitak earthquake. Proceedings of the National Academy of Sciences of Armenia. Earth Sciences. 2008. Vol. LXI. No. 1. pp. 32–38. (In Russ.)
6. Nazaretyan S.N. Seismic hazard and risks of the territories of the cities of the 1988 Spitak earthquake zone. Ed. S.S. Darbinyan. Yerevan. Gitutyun. 2013. 212 p. (In Russ.)
7. Ovsyuchenko A.N., Edemsky D.E., Nechaev S.Yu., Korzhnikov A.M., Larkov A.S., Averin A.A. Research of sources of strong historical earthquakes using geophysical, paleo-, archeo- and

historical seismology: Fiagdon Basin in North Ossetia. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 1. pp. 64–89. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.37.005. (In Russ.)

8. Ovsyuchenko A.N., Larkov A.S., Andreeva N.V., Lukashova R.N. Seismotectonics of sources of strong earthquakes in the Caucasus: Results of studies by Evgeny Alexandrovich Rogozhin. *Russian Journal of Seismology*. 2023. Vol. 5. No. 3. pp. 28–44. DOI: 10.35540/2686-7907.2023.3.02. (In Russ.)

9. Rebetskii Yu.L., Arefev S.S., Nikitina E.S. Monitoring of stressed state in the aftershock region of the Spitak earthquake. *Doklady Earth Sciences*. 2000. Vol. 5. No. 3. pp. 28–44. DOI: 10.35540/2686-7907.2023.3.02. (In Russ.)

10. Rebetsky Yu.L., Dobrynina A.A., Sankov V.A. Current Stress Pattern and Geodynamics of the Baikal Rift System. *Geology and Geophysics*. 2023. Vol. 64. No. 1. pp. 87–111. DOI: 10.15372/GiG2022110. (In Russ.)

11. Khachiyan E.E. The Spitak earthquake of 7 December 1988: main seismological characteristics and analysis of its destructive effects (to the thirty years after the earthquake). *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2018. No. 4. pp. 9–30. (In Russ.)

12. Cisternas A., Philip H., Arefev S.S., Bousquet J.C. et al. The Spitak (Armenia) earthquake of 7 December 1988: Field observations, seismology and tectonics. *Nature*. 1989. Vol. 339. No. 6227. pp. 675–679. DOI: 10.1038/339675a0.

13. Dorbath L., Dorbath C., Rivera L., Fuenzalida A., Cisternas A., Tatevossian R., Aptekman J., Arefev S. Geometry, segmentation and stress regime of the Spitak (Armenia) earthquake from the analysis of the aftershock sequence. *Geophysical Journal International*. 1992. Vol. 108. pp. 309–328.

14. Haessler H., Deschamps A., Dufumier H., Fuenzalida H., Cisternas A. The rupture process of the Armenian earthquake from broad-band teleseismic body wave records. *Geophysics*. 1992. Vol. 109. Issue 1. pp. 151–161.

15. Karakhanyan A., Arakelyan A., Avagyan A., Sadoyan T. Aspects of the seismotectonics of Armenia: New data and reanalysis. Tectonic Evolution, collision, and seismicity of Southwest Asia: In honor of Manuel Berberian's forty years of research contributions. *Geological Society of America*. 2017. Vol. 525. pp. 445–477. DOI: 10.1130/2016.2525(14).

16. Koper K.D., Pankow K.L., Pechmann J.C., Hale J.M., Burlacu R., Yeck W.L., Benz H.M. et al. Afterslip enhanced aftershock activity during the 2017 earthquake sequence Near Sulphur Peak, Idaho. *Geophysical Research Letters*. 2018. pp. 5352–5361. DOI: 10.1029/2018GL078196.

17. Nazaretyan S. The 1988 Spitak earthquake in photos, facts and comments. Republic of Armenia. Gitutyun. 2018. 140 p.

18. Results and data from seismological and geological studies of the earthquakes of December 7, 1988, near Spitak, Armenia SSR. Vol. 1. Ed. R.D. Borchardt. California: United States Department of the Interior. Geological Survey. 1989. 189 p. DOI: 10.3133/ofr89163A.

19. Sahakyan E.E. The features of stress field in the Javakheti volcanic highland determined the earthquake focal mechanisms for the time period 2005–2017. *Proceedings of the NAS RA. Earth Sciences*. 2018. No. 2. pp. 38–51.

УДК 550.348.435

DOI: 10.46698/VNC.2026.17.22.001

Оригинальная статья

Общие свойства и особенности очаговых параметров землетрясений юго-запада Черноморской впадины

Б.Г. Пустовитенко[✉], Э.Э. Эреджепов[✉]

Крымский Республиканский Центр оценки сейсмической и оползневой опасности, технического обследования объектов строительства, Россия, 295013, г. Симферополь, ул. Севастопольская, 45, e-mail: bpustovitenko@mail.ru

Статья поступила: 26.11.2025, доработана: 30.01.2026, принята к публикации: 03.02.2026

Резюме: Актуальность работы. Для оценки сейсмической опасности территории Крыма необходимы знания о моделях очагов, параметрах сейсмогенерирующих структур и сейсмичности всего Крымско-Черноморского региона, включая бассейн Черного моря. Юго-западная часть Черноморской впадины в этом отношении менее изучена, чем другие районы региона. Очаговые параметры землетрясений являются также одними из главных, по которым реконструируются геодинамические модели литосферы морских территорий, скрытых от прямых наблюдений. **Цель исследования.** Оценка и сравнительный анализ кинематических, спектральных, динамических и энергетических параметров очагов наиболее сильных землетрясений с магнитудой $M_w=4.1-5.1$ южной части Западно-Черноморской впадины, для установления их общих свойств и особенностей. **Методы исследования.** Спектральный метод Фурье для расчета спектров объемных сейсмических волн и оценки по ним динамических параметров очагов в рамках теоретической модели Бруна (ω^{-2}). Сравнение полученных результатов с долговременными параметрами для данного энергетического уровня. Применение модели источника в виде двойного диполя для восстановления кинематических характеристик – фокального механизма. Сравнение полученных решений механизма очагов землетрясений с опубликованными данными о параметрах их центроидов. Исследование индивидуальных особенностей очаговых параметров и их общих свойств. **Результаты исследования.** Получены новые данные об очаговых параметрах наиболее сильных землетрясений юго-запада Черноморской впадины, произошедших в период 2016–2024 гг. Все землетрясения возникли в обстановке горизонтальных напряжений сжатия со взбросовой подвижкой в очагах в ограниченной области литосферы, представленной в виде эллипсоида, вытянутого в азимуте около 45° по отношению к сейсмическим станциям Крыма. Динамические и энергетические параметры очагов восстановлены по группе независимых определений и относятся к категории надежных. Новые экспериментальные данные могут служить основой разработки моделей очагов и сейсмогенерирующих структур юго-запада Черноморской впадины.

Ключевые слова: фокальный механизм, сейсмический момент, радиус круговой дислокации, сброшенное напряжение, энергия дислокации, сейсмическая энергия.

Для цитирования: Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э. Общие свойства и особенности очаговых параметров землетрясений юго-запада Черноморской впадины. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 44-56. DOI: 10.46698/VNC.2026.17.22.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.17.22.001

Original article

General properties and features of earthquake source parameters in the southwestern part of the Black Sea Basin

B.G. Pustovitenko^{ORCID}, E.E. Eredzhepov^{ORCID}

Crimean Republican Center for Assessment of Seismic and Landslide Hazards,
Technical Survey of Construction Facilities, 45 Sevastopolskaya Str., Simferopol 295013,
Russian Federation, e-mail: bpustovitenko@mail.ru

Received: 26.11.2025, revised: 30.01.2026, accepted: 03.02.2026

Abstract: Relevance. Assessing the seismic hazard of the Crimean territory requires knowledge of earthquake source models, parameters of seismogenic structures, and seismicity across the entire Crimean-Black Sea region, including the Black Sea basin. The southwestern part of the Black Sea Basin is less studied in this regard than other areas of the region. Earthquake source parameters are also among the key parameters used to reconstruct geodynamic models of the lithosphere in marine areas hidden from direct observation. **Aim.** Assessment and comparative analysis of the kinematic, spectral, dynamic, and energy parameters of the strongest earthquakes with $M_w=4.1-5.1$ that occurred in the southern part of the Western Black Sea Trench, in order to establish their common properties and features. **Methods.** The Fourier spectral method was used for calculating the body wave spectra and estimating the dynamic parameters of earthquakes based on them within the framework of the theoretical dislocation model of Brun (ω^{-2}). Comparison of the obtained results with long-term parameters for a given energy level. Application of the dislocation model of the source in the form of a double dipole to restore the kinematic characteristics – focal mechanism. Comparison of the obtained solutions of the mechanism of earthquake sources with the published data on the parameters of their centroids. Research of individual features of focal parameters and their general properties. **Results.** New data on the focal parameters of the four strongest earthquakes, which occurred in the period 2016–2024 in the southern part of the Western Black Sea depression, have been obtained. All the earthquakes occurred in a situation of horizontal compression stresses with reverse movement in the foci in a relatively limited area of the lithospheres, represented as an ellipsoid, elongated in a north-eastern direction at an azimuth of about 45° relative to the seismic stations in Crimea. The dynamic and energy parameters of the foci have been restored based on a group of independent determinations with a low standard deviation and are considered reliable. The new experimental data can serve as a basis for developing models of the foci and seismogenic structures in the south of the western Black Sea depression.

Keywords: focal mechanism, seismic moment, circular dislocation radius, released stress, dislocation energy, seismic energy.

For citation: Pustovitenko B.G., Eredzhepov E.E. General properties and features of earthquake source parameters in the southwestern part of the Black Sea Basin. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 44–56. DOI: 10.46698/VNC.2026.17.22.001

Введение. Постановка задачи

Сейсмоактивная область Западно-Черноморской впадины входит в пределы границ Крымско-Черноморского региона, принятых в 1985 г. [Землетрясения ..., 1988, с. 4–6] при регионализации территорий для проведения сейсмического мониторинга сетью региональных сейсмостанций Крыма и параметризации активных сейсмогенерирующих структур региона (зон ВОЗ) для оценки долговременной сейсмической опасности.

В связи с удаленностью от сейсмических станций Крыма, этот район слабо изучен в сейсмическом отношении, т.к. технические возможности сейсмической ап-

паратуры и их малочисленность на полуострове многие годы не позволяли надежно регистрировать слабые толчки с энергетическими классами $K_{п} \leq 10$ (по региональной энергетической шкале) и магнитудами $M_w \leq 3.5$. В современную эпоху цифровой регистрации и оперативного получения исходной информации с других станций Мировой сети стало возможным понизить энергетический порог представительных землетрясений во всем регионе, включая южную часть Западно-Черноморской впадины и увеличить точность определения основных параметров гипоцентров. Одновременно появилась возможность надежно решать обратные задачи по физике очага землетрясений: восстанавливать механизм очагов и их динамические параметры – прямые источники информации о геодинамических и тектонофизических процессах в литосфере впадины Черного моря.

Задачей данной статьи явилось совместное рассмотрение очаговых параметров (кинематических, спектральных, динамических и энергетических) наиболее сильных землетрясений с $K_{п} \geq 11$ ($M_w \geq 4$) южной части Западно-Черноморской впадины для выявления их общих свойств и особенностей в целях дальнейшего совершенствования моделей очагов и параметров сейсмогенерирующих структур этого района.

Общие сведения о рассматриваемых землетрясениях

За последние 10 лет сетью сейсмических станций Крыма зарегистрировано 82 землетрясения в диапазоне энергетических классов $K_{п} = 7-13$, произошедших в районе глубоководной впадины Черного моря. Из них 16 с $K_{п} \geq 9$ относятся к южной части Западно-Черноморской впадины в пределах географических координат: $\varphi^{\circ} = 42-43$, $\lambda^{\circ} = 30.5-32$. Четыре наиболее сильных землетрясения за этот период (табл. 1), зарегистрированы не только сеймостанциями Крыма, но также большим количеством станций Мира (ISC – International Seismological Centre. <https://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin>).

Таблица 1 / Table 1

Основные параметры землетрясений юга Западно-Черноморской впадины за 2016–2024 гг., для которых определены очаговые параметры / Main parameters of earthquakes in the south of the Western Black Sea Basin for 2016–2024, for which focal parameters have been determined

№	Дата, Date	t_0 , ч мин с/ Time, h m s	Эпицентр/ epicenter		h , км/ deep, km	$K_{п}$	M_w/n , (mb)	Источник /Author
			φ° , N	λ° , E				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2016.06.28	04 23 48.1	42.46	31.59	35	10.9	4.1/7	[Свидлова и др., 2017 / Svidlova et al., 2017]
		04 23 46.5	42.60	31.60	31		3.5	(ISC)
2	2016.10.15	08 18 33.3	42.12	30.70	17	13.1	5.1/5	[Свидлова и др., 2017 / Svidlova et al., 2017]
		08 18 32	42.19	30.68	5		(5.2)	(ISC)
		08 18 35.9	42.5	31.05	22		5.3	(GCMT, 2025)
3	2022.04.11	17 38 42.7	42.25	31.35	23	12.0	4.6/7	[Калинюк и др., 2023 / Kalinyuk et al., 2023]
		17 38 41.1	42.39	31.09	7		(4.6)	(ISC)
		17 38 43.0	42.33	31.03	24		4.5	(GCMT, 2025)
4	2024.10.11	07 16 39.4	42.58	31.42	9	12.9	4.9/7	Наст. статья/ this article
		07 16 44.9	42.72	31.48	17		5.0	(GCMT, 2025)
		07 16 43	42.63	31.32	10		4.8	(ISC Norsar)
		07 16 49.5	42.65	31.42	11		4.8	(ISC NIEC)

Примечание: значения M_w/n в графе 8 – из табл. 3 настоящей статьи, где n – число станционных определений / Note: the M_w/n values in column 8 are from Table 3 of this article, where n is the number of station definitions.

Это позволило с большой точностью определить основные параметры их гипоцентров, а также по представительной выборке волновых форм надежно восстановить характеристики очаговых процессов.

Основные параметры выбранных для сравнительного анализа землетрясений с $K_p \geq 11$ ($M_w \geq 4.1$) представлены в таблице 1, а их пространственное расположение – на рисунке 1. В таблице 1 приведены также результаты обработки в Международном центре ISC, в том числе данные по методу тензора сейсмического момента (TCM) [Dziewnski et al., 1981], определяющего параметры центроида – центра максимального разрушения среды в гипоцентре очаговой зоны (GCMT – Global Centroid Tensor (GCMT) Catalog Search (2025). <https://www-globalcmt.org>; NEIC – <https://www.isc.ac.uk/cgi-bin/agency-get?agency>; Norsar – Norwegian Seismic Array).

Сравнивая координаты гипоцентров начала разрыва и центроидов (табл. 1), можно сделать предположение, что разрушение среды в очаговых зонах шло сверху вниз ($h_{TCM} > h$), погружаясь в северо-восточном направлении при землетрясениях 15.10.2015 г. и 11.10.2024 г. (азимут 40° и 18° соответственно) и в западном (азимут 289°) – при 11.04.2022 г.

Эпицентры рассматриваемых землетрясений пространственно образовали компактную группу, распределенную на площади в виде эллипса с длиной большой оси около 80 км, вытянутого в северо-восточном направлении, в азимуте около 45° по отношению к сейсмическим станциям Крыма. Очаги землетрясений мигрировали вдоль зоны со средней скоростью волны деформации среды около $V=10$ км/год.

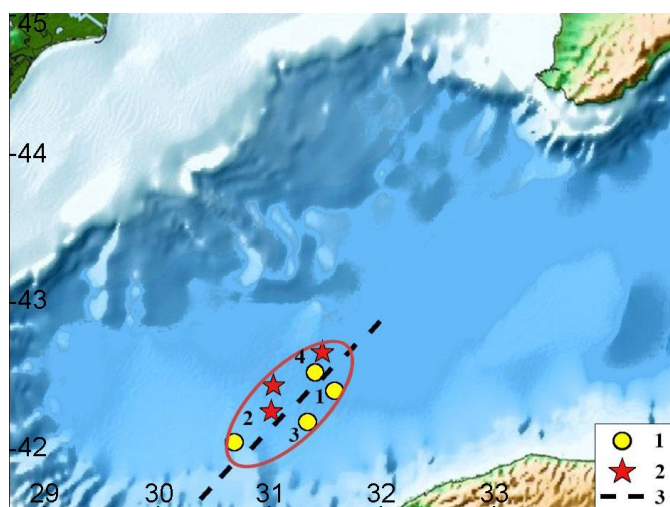


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений южной части Западно-Черноморской впадины за 2016–2024 гг. с $M_w > 4$. 1 – эпицентры землетрясений; 2 – эпицентры центроидов; 3 – большая ось эллипса (зоны очагов).

Цифры рядом с эпицентрами – номера землетрясений по таблице 1 /

Fig. 1. Map of earthquake epicenters in the southern part of the Western Black Sea Trench for 2016–2024 with $M_w > 4$.

1 – earthquake epicenters; 2 – centroid epicenters; 3 – major axis of the ellipse (focal zones).

Numbers are earthquake numbers according to Table 1

С учетом глубин гипоцентров (табл. 1) общий объем среды, вмещающий очаги землетрясений, представлен эллипсоидом размерами примерно $80 \times 30 \times 30$ км с простиранием и заглублением к северо-востоку. Следуя схеме дорифейского фундамента Черного моря [Геология ..., 1987, с. 80, рис. 36] можно предположить, что данная группа сейсмических событий связана с зоной крупного Орехово-Павлоградского мантийного разлома, тянущегося от юго-западной части Турции диагонально к северо-востоку Крыма и Азовскому морю.

Исходные данные и методика исследования

Исходными данными для определения **кинематических** характеристик очагов землетрясений служили знаки первых вступлений продольных сейсмических волн P (сжатия и разрежения) на станциях Крыма и Мировой сети, а также дополнительно собранные по региональным сейсмограммам и сейсмическим бюллетеням Турции и Северного Кавказа. В результате получен статистически представительный материал (от $n=66$ до $n=118$) по станциям, окружающим источники излучения сейсмических волн в широком азимутальном створе для надежного решения механизма очагов с минимальными погрешностями.

Углы выхода сейсмических волн из очага на сейсмические станции регистрации рассчитывались по таблицам из работы [Kennet, 2005], исходя из глубины гипоцентра и удаленности станций регистрации от источника.

Решения механизма очагов (табл. 2, рис. 2) нами получены на основе теории дислокации в рамках модели двойного диполя [Введенская, 1969] по стандартной методике [Балакина и др., 1972]. Для всех землетрясений имеются также опубликованные в (ISC, GCMT) решения фокальных механизмов по методу тензора сейсмического момента (ТСМ). Для наиболее сильного землетрясения 15 октября 2016 г. с $K_H=13.1$ параметры фокального механизма по знакам вступления волн P взяты из (ISC) и нами не пересматривались.

Спектральные, динамические и энергетические параметры очагов восстановлены по 42 амплитудным спектрам Фурье цифровых записей объемных волн на шести региональных сейсмических станциях: «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU), «Ялта» (YAL) и «Донузлав-2» (DNZ2).

Для расчета амплитудных спектров использованы записи только с четкими фазами объемных P - и S -волн, с превышением полезного сигнала над фоном помех в два раза и более. Пример волновых форм землетрясений представлен на рисунке 2.

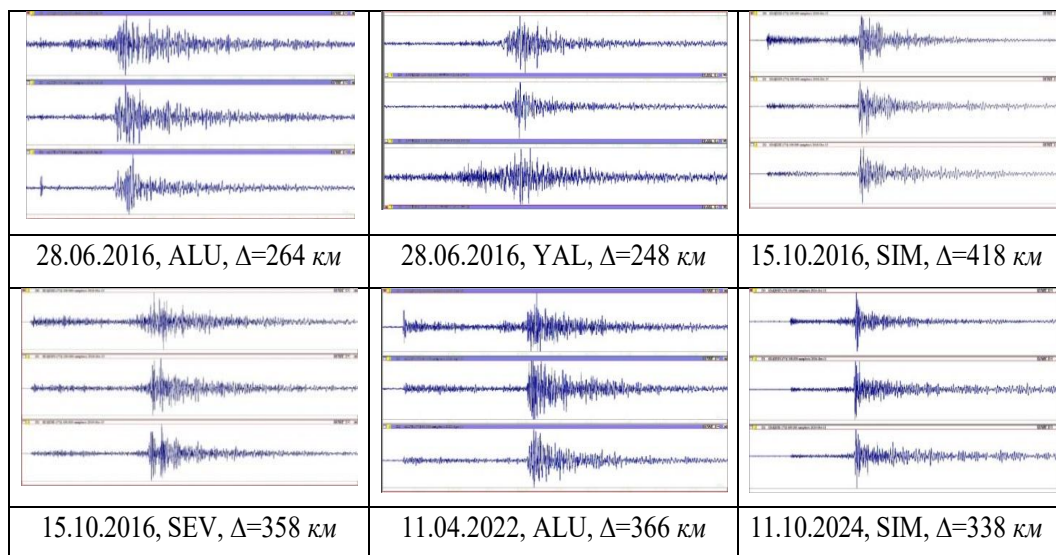


Рис. 2. Примеры волновых форм рассматриваемых землетрясений на сейсмических станциях Крыма. Составляющие записи сверху вниз: вертикальная – Z, горизонтальные – N-S и E-W /

Fig. 2. Example of waveforms of the earthquakes under consideration at Crimean seismic stations. The components of the record from top to bottom are: vertical – Z, horizontal – N-S and E-W

Амплитудные спектры поперечных волн (S) рассчитывались отдельно по записям двух горизонтальных составляющих (N-S) и (E-W) и окончательная спектральная

плотность для расчета динамических параметров вычислялась как полный вектор колебаний, а продольных (P) – по вертикальной компоненте (Z). Наибольшее количество спектров получено по записям S -волн. Интерпретация спектров и оценка динамических параметров очагов выполнена в рамках теоретической дислокационной модели Бруна (ω^{-2}) [Brune, 1970] по методике [Аптекман и др., 1989; Пустовитенко, Пантелеева, 1990].

Рассчитанные амплитудные спектры землетрясений (рис. 3) уверенно аппроксимированы параметрами теоретической модели (ω^{-2}): спектральной плотностью $\Omega_0(x, f)$ в низкочастотной части амплитудного спектра при $f \rightarrow 0$, точкой излома спектра – угловой частотой f_0 (ω_0) и резким спадом амплитуд спектра по квадратичному закону, т.е. с углом наклона $\gamma \sim -2$ (рис. 3).

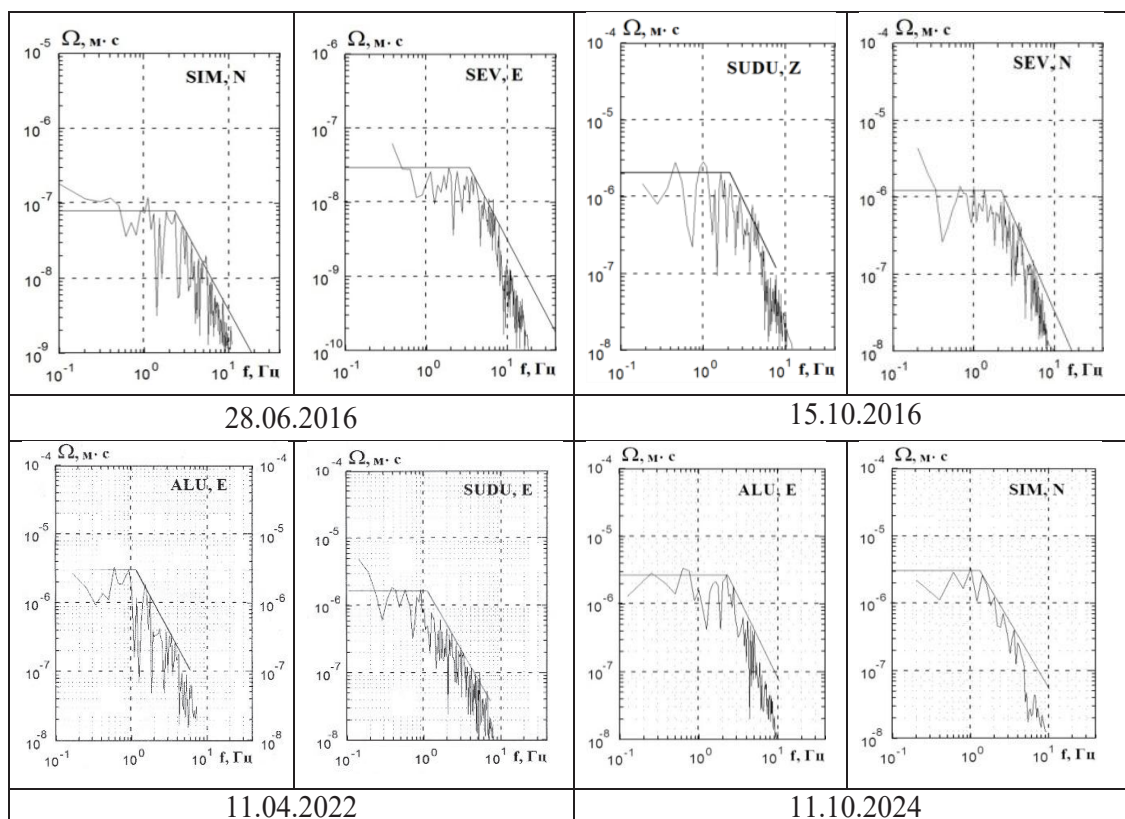


Рис. 3. Примеры амплитудных спектров S -волн землетрясений по таблице 1, рассчитанных по записям сейсмостанций Крыма и их аппроксимация (прямые линии) в рамках модели ω^{-2}

Fig. 3. Examples of amplitude spectra of S -waves of earthquakes according to Table 1, calculated from records of Crimean seismic stations and their approximation (straight lines) within the ω^{-2} model

Согласно модели Бруна [Brune, 1970], модифицированной Хэнксом и Виссом [Hanks, Wyss, 1972], спектральная плотность Ω_0 пропорциональна сейсмическому моменту M_0 – энергии, затраченной на перемещение крыльев разрыва относительно друг друга на среднюю величину дислокации, преодолев силу трения, а угловая частота f_0 связана с размером разрыва, представленного в виде круга с радиусом дислокации r_0 :

$$M_0 = \Omega_0(4\pi\rho \cdot V^3) / R_{\theta\phi} \cdot G(\Delta, h) \cdot C(\omega) \cdot Sm(f)$$

$$r_0 = 2.34 \frac{V}{2\pi f_0}$$

где V – скорость распространения объемной волны; r – плотность пород в окрестности очага; $G(\Delta, h)$ – поправка за геометрическое расхождение; $C(\omega)$ – частотная характеристика среды под сейсмической станцией; $Sm(f)$ – поправка за неупругое затухание в мантии; $R_{\theta\phi}$ – поправка за направленность излучения из очага на станцию регистрации.

Параметры моделей глубинной среды в очаговой зоне землетрясения и на пути распространения сейсмических волн подбирались по работе [Starostenko et al., 2004] в соответствии с пространственным расположением его гипоцентра. Поправка $R_{\theta\phi}$ рассчитана из данных решения механизма очагов.

По значениям сейсмического момента M_0 и размера разрыва r_0 определены также другие динамические параметры очага: средние величины напряжений в очаге (сброшенное $\Delta\sigma$ и кажущееся $\eta\sigma$), средняя подвижка по разрыву $\bar{U}$, энергия образования дислокации E_U , упругая деформация сдвига в окрестности очага e и величина радиационного трения $\Delta\sigma_r$ по формулам из работ [Аптекман и др., 1989; Кейлис-Борок, 1959; Костров, 1975; Пустовитенко, Пантелеева, 1990]:

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r_0^3} \quad \eta\sigma = \frac{\mu \cdot E_s}{M_0} \quad \bar{U} = \frac{M_0}{\mu \cdot \pi r_0^2} \quad E_U = \frac{1}{2} \Delta\sigma \bar{U} \cdot \pi r_0^2 \quad \varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{\mu}$$

$$\Delta\sigma_r = 1/2 \Delta\sigma - \eta\sigma$$

где μ – модуль сдвига; η – сейсмический коэффициент полезного действия; E_s – сейсмическая энергия источника.

По оценкам скалярных сейсмических моментов M_0 рассчитана моментная магнитуда M_w с использованием формулы [Hanks, Kanamori, 1979]:

$$M_w = 2/3 \times (\lg M_0 + 7) - 10.7,$$

где M_0 имеет размерность Н $\times$ м.

Дополнительно также проведена оценка той части полной энергии, затраченной на деформацию среды в очаговых зонах землетрясений (M_0), которая была выделена в виде сейсмических колебаний (E_s) и израсходована на дислокацию (E_U), т.е. приведенной сейсмической и дислокационной энергии e и d по соотношениям:

$$e = E_s / M_0 = 10^{Kn} / M_0 \cdot 10^{13},$$

$$d = E_U / M_0 \cdot 10^{13}$$

где E_s в Дж, M_0 в Н $\times$ м.

Обсуждение результатов

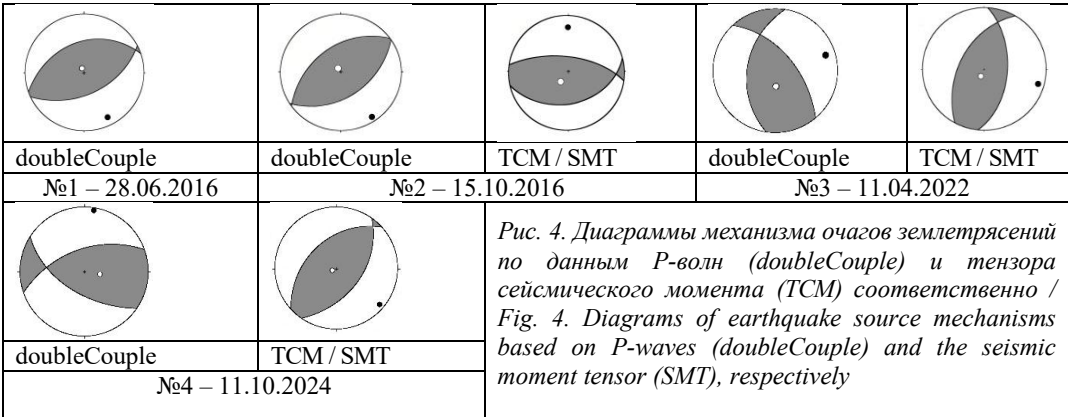
Кинематические параметры очагов. В результате решения фокальных механизмов землетрясений получены параметры двух возможных поверхностей разрыва (нодальных плоскостей $NP1$ и $NP2$) и ориентации осей главных напряжений, под действием которых произошла подвижка (дислокация) в очаге: растяжения T , промежуточного N и сжатия P . Результаты решения механизмов очагов в рамках двойного диполя (doubleCouple) и методом (TCM) приведены в таблице 2 (в общепринятых международных форматах), а их стереограммы в нижней полусфере – на рисунке 4.

Как следует из таблицы 2 и рисунка 4, все рассмотренные землетрясения, как по данным решений (doubleCouple), так и TCM, произошли в обстановке горизонтальных сил сжатия с преобладанием взбросовой подвижки в очагах преимущественно близдиагональной ориентации плоскостей разрыва.

Таблица 2 / Table 2

Параметры механизмов очагов землетрясений за 2016–2024 гг. юга Западно-Черноморской впадины / Parameters of earthquake source mechanisms for 2016-2024 in the south of the Western Black Sea Basin

№	Дата/ Date	Оси главных напряжений / axes of the main stresses						Нодальные плоскости / nodal planes						Источник / source
		<i>T</i>		<i>N</i>		<i>P</i>		<i>NP1</i>			<i>NP2</i>			
		<i>AZM</i>	<i>PL</i>	<i>AZM</i>	<i>PL</i>	<i>AZM</i>	<i>PL</i>	<i>STK</i>	<i>DP</i>	<i>SLIP</i>	<i>STK</i>	<i>DP</i>	<i>SLIP</i>	
1	2016. 06.28	325	81	66	2	156	9	65	54	88	248	36	93	[Пустовитенко и др., 2022 / Pustovitenko et al., 2022]
2	2016. 10.15	335	88	236	0	146	2	56	47	91	236	43	89	(ISC, NEIC)
		219	72	92	11	360	14	75	33	70	279	60	103	(ISC, GCMT)
3	2022. 04.11	178	64	337	25	71	8	320	58	60	187	43	128	[Пустовитенко и др., 2023 / Pustovitenko et al., 2023]
		208	77	12	15	105	3	4	49	74	208	44	109	(ISC, GCMT)
4	2024. 10.11	98	60	278	30	8	0	252	52	51	125	52	129	Наст. статья / this article
		242	83	39	6	130	3	34	48	82	226	43	99	(ISC, GCMT)



Несмотря на однотипность поля напряжений, под действием которого возникли все землетрясения, их фокальные механизмы имели отличительные особенности. Так, если во время землетрясений 2016 г. (№1 и №2) произошел чистый взброс по наклонным диагональным плоскостям, то очаги 2022 г. и 2024 г. (№3 и №4) относятся к взбросо-сдвиговому типу подвижки с преобладанием взброса над сдвигом (косой взброс с правосторонней компонентой смещения).

По данным TCM в момент максимального разрушения среды произошло изменение направления первичного поля напряжений на угол от 26° до 50° без изменения кинематического типа движений. Эти изменения могут быть связаны как с возможными допустимыми погрешностями в определении фокального механизма разными методами, так и с реальной трансформацией полей напряжений в процессе сложного вспарывания разрывов, что наиболее вероятно, поскольку все решения относятся к надежным.

Следует также отметить, что надежность восстановления фокальных механизмов по первым вступлениям P-волн (doubleCouple), подтверждается тем фактом, что на

стереограммах механизмов очагов положения сейсмостанций Крыма оказались вблизи нодальных плоскостей, вдоль которых излучение P -волн минимальное, а S -волн – максимальное. Это хорошо видно на записях (см. рис. 2). Так при землетрясениях 2016 г. амплитуды P -волн на станциях ALU, YAL с трудом видны на фоне помех, а отношение амплитуд A_s/A_p для всех станций в несколько раз превосходило среднее региональное значение $A_s/A_p=4$.

Динамические параметры очагов получены по группе станционных определений (n) с учетом логнормального закона распределения величин [Пустовитенко, Пантелеева, 1990]. В таблице 3 представлены их средние значения (S) и стандартные отклонения (δS).

Таблица 3 / Table 3

Динамические параметры очагов землетрясений юга Западно-Черноморской впадины за 2016–2024 гг. / Dynamic parameters of earthquake foci in the south of the Western Black Sea Basin for 2016–2024

№ по табл. 1 / No. to Table 1	Дата / Date	n данных / data	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н·м/H·m	r_0 , км/km	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па / Pa	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\dot{u} \cdot 10^{-2}$, м/м	$\eta\sigma \cdot 10^5$, Па / Pa	$\Delta\sigma_f \cdot 10^5$, Па / Pa	$E_0 \cdot 10^8$, Джс / J	M_w^*	$e \cdot 10^{-5}$	$d \cdot 10^{-5}$	d / e
1	28.06.2016	7	182.4	0.73	20.7	34.5	1.83	7.4	0.3	314	4.11	4.35	1.75	0.4
	δS		0.07	0.02	0.07	0.07	0.06	0.07		0.13	0.1			
2	15.10.2016	4	4769	1.18	125.6	418.3	36.1	12.6	50	99740	5.06	26.4	20.9	0.8
	δS		0.16	0.02	0.14	0.14	0.14	0.16		0.29	0.2			
3	11.04.2022	7	842	1.1	28	93.1	7.44	6.34	7.7	3928	4.55	11.47	4.66	0.41
	δS		0.06	0.01	0.05	0.05	0.05	0.06		0.1	0.09			
4	11.10.2024	7	2991	0.82	223	743	45	21	91	106114	4.91	24·10	35.5	1.47
	δS		0.017	0.005	0.02	0.02	0.02	0.01		0.03	0.02			

Примечание: жирным шрифтом выделены средние значения величин S /

Note: the average values of S are highlighted in bold.

Станционные параметры радиационного трения $\Delta\sigma_r$ получились знакопеременными, поэтому их среднее значение вычислено по S для данного очага напряжения $\Delta\sigma$ и $\eta\sigma$ без оценки δS . Среднее значение M_w определено как среднее арифметическое (M_w^*) с соответствующей погрешностью. Для всех землетрясений динамические параметры получены по группе независимых станционных определений ($n \geq 4$) и с учетом реальной направленности излучения сейсмической энергии из источника на каждую станцию регистрации ($R_{\theta\varphi}$). Это нивелировало индивидуальные станционные особенности записей сейсмических колебаний на станциях регистрации, расположенных в разных инженерно-геологических условиях, оснащенных различающейся сейсмической аппаратурой и обеспечило достаточно высокую точность и надежность результатов. Наилучшая сходимость станционных определений получена для радиуса круговой дислокации преимущественно при стандартном отклонении $\delta S \cdot r_0 \leq 0.02$.

Наибольшие значения сейсмического момента M_0 и радиуса дислокации r_0 получены для землетрясения 15.10.2016 г. с $M_w=5.1$, а наименьшие – для 28.06.2016 г. с $M_w=4.1$. В целом с ростом энергетического уровня землетрясений количественные значения динамических параметров очагов увеличивались в пределах разброса измеряемых величин. Радиационное трение $\Delta\sigma_r$ для исследованных землетрясений имело положительное значение, что в соответствии с [Костров, 1975] указывает на гладкое

скольжение разрыва в очагах за счет равномерного распределения прочностных свойств глубинной среды в очаговых зонах.

Сравним полученные средние значения основных очаговых параметров: M_0 , r_0 и $\Delta\sigma$ исследованных землетрясений (рис. 5) с установленными для всего региона долговременными соотношениями: $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$, $\Delta\sigma(K_{II})$, уравнения которых приведены в работе [Пустовитенко и др., 2022].

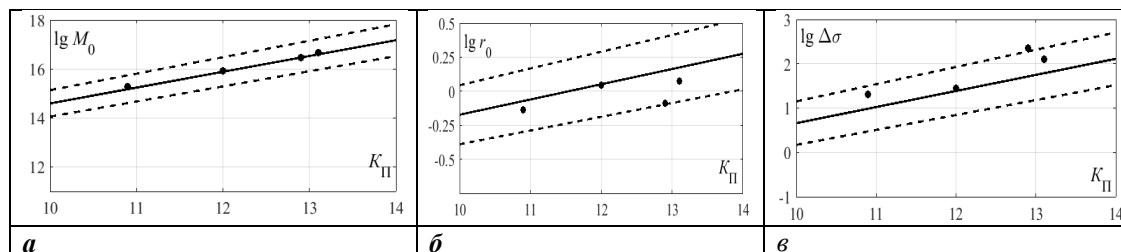


Рис. 5. Сравнение средних динамических параметров очагов землетрясений:

a – сейсмического момента M_0 , **б** – радиуса круговой дислокации r_0 и **в** – сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ с долговременными зависимостями $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$ и $\Delta\sigma(K_{II})$. Пунктир – пределы погрешностей долговременных зависимостей /

Fig. 5. Comparison of the average dynamic parameters of earthquake foci: **a** – seismic moment M_0 , **b** – circular dislocation radius r_0 , and **c** – released stress $\Delta\sigma$ with long-term dependencies $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$, and $\Delta\sigma(K_{II})$. The dotted lines indicate the error limits of the long-term dependencies

Наглядно видно (рис. 5), что численные значения основных очаговых параметров M_0 , r_0 и $\Delta\sigma$ исследованных землетрясений соответствуют долговременным значениям по корреляционным связям $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$ и $\Delta\sigma(K_{II})$, находясь в диапазоне их доверительного интервала. Поскольку эти очаговые параметры определены с высокой точностью, то их вариации внутри интервала погрешностей $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$ и $\Delta\sigma(K_{II})$ можно отнести к природным, связанным с индивидуальными особенностями свойств глубинной среды и физических процессов в отдельных очаговых зонах. Так дислокация в очаге землетрясения 11.10.2024 г. произошла на сравнительно малой площади разрыва с заниженным радиусом r_0 (рис. 5б) при повышенном сброшенном напряжении $\Delta\sigma$ (рис. 5в). Для этого землетрясения получены также завышенные значения величины подвижки по разрыву $\bar{U}$, деформации сдвига e , а также энергии дислокации в очаге E_u для данного энергетического уровня (табл. 3). Соответственно доля полной энергии деформации среды, потраченной на дислокацию в очаге (**d**) этого землетрясения превысила долю сейсмической энергии **e**, излученной в виде сейсмических колебаний почти в полтора раза ($d/e=1.47$). Для остальных землетрясений соотношение дислокационной и сейсмической энергии было обратным, т.е. большая часть общей очаговой энергии перешла в сейсмические колебания: $d/e=0.4-0.8$ (табл. 3). Общий диапазон приведенной сейсмической энергии **e** для рассмотренных землетрясений составил $e=4.4\cdot 10^{-5}-26.4\cdot 10^{-5}$, что по классификации [Кочарян, 2016] соответствует «нормальным» сейсмическим событиям.

Выводы

Комплексное исследование очагов наиболее сильных землетрясений с $M_w=4.1-5.1$ южной части Западно-Черноморской впадины за последние 10 лет позволило установить их общие свойства и особенности.

1. Все рассмотренные землетрясения произошли под воздействием сжимающих напряжений в ограниченной области литосферы зоны крупного разлома мантийного заложения, пересекающего Западно-Черноморскую впадину диагонально с юга-запада на северо-восток. В очагах землетрясений возникли взбросовые и

взбросо-сдвиговые подвижки также преимущественно диагональной ориентировки с максимальным излучением энергии поперечных сейсмических волн на побережье Крыма. В процессе максимального разрушения среды (в гипоцентре центроида) произошло изменение направления первичного поля напряжений сжатия на 26–50 градусов без изменения кинематического типа движений по тектоническим разрывам.

2. Средние значения динамических параметров очагов, определенные с малой дисперсией ошибок, не противоречат долговременным статистическим значениям для данных уровней энергии и могут быть использованы в задачах инженерной сейсмологии.

3. Установленные общие свойства очаговых параметров рассмотренных землетрясений могут служить основой для создания моделей прогнозных очагов сильных землетрясений в южной части Западно-Черноморской впадины, а также для уточнения общей модели сейсмогенерирующих структур (зон ВОЗ) Крымско-Черноморского региона и последующей разработки карт ОСР нового поколения в инженерных терминах [Аптикаев, 2021].

Литература

1. Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И., Зобин В.М., Коган С.Я., Корчагина О.А., Москвина А.Г., Поликарпова Л.А., Чепкунас Л.С. Спектры Р-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага. // *Вулканология и сейсмология*. – 1989. – № 2. – С. 66–79.
2. Аптикаев Ф.Ф. О картах ОСР в ускорениях. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021 – Т. 11. № 1. – С. 95–103. DOI: 10.46698/VNC.2021.24.94.008.
3. Балакина Л.А., Введенская А.В., Голубева Н.В., Мишарина Л.А., Широкова Е.И. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М.: Наука, 1972. – 198 с.
4. Введенская А.В. Исследования напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. – 136 с.
5. Геология шельфа УССР. Тектоника. / Гл. ред. Е.Ф. Шнюков. – Киев: Наукова Думка, 1987 – 152 с.
6. Землетрясения в СССР в 1985 году. / Отв. ред. Н.В. Кондорская. – М.: Наука, 1988. 349 с.
7. Калинин И.В., Свидлова В.С., Бондарь М.Н., Бойко В.А. Сейсмичность Крыма в 2022 году. // *Ученые записки Крымского федерального университета им В.И. Вернадского. География. Геология*. – 2023. – Т. 9(75). № 4. – С. 124–138.
8. Кейлис-Борок В.И. Исследование источников, приближенно эквивалентных очагам землетрясений. // *Труды Геофизического Института АН СССР*. – 1959. – № 9(136). – С. 20–42.
9. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. – 176 с.
10. Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М: ГЕОС, 2016. – 424 с.
11. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. Киев: Наукова думка, 1990. – 251 с.
12. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э., Бондарь М.Н. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2016–2017 гг. // *Землетрясения Северной Евразии*. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017). – С. 242–252. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.22.
13. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э., Бондарь М.Н. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма 2022 года. // *Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология*. – 2023. – Т. 9(75). № 4. – С. 138–155.
14. Свидлова В.А., Сыкчина З.Н., Бондарь М.Н., Бойко В.А. Сейсмичность Крыма в 2016 году. // *Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия «География»*. – 2017. – Т. 3(69). №4. – С. 7–50.

15. 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.
16. Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H. Determination of earthquakes source parameters from wave-form data for studies of global and regional seismicity. // *Journal of Geophysical Research*. – 1981. – Vol. 86. – pp. 2825–2852.
17. Hanks T.C., Kanamori H. A moment magnitude scale. // *Journal of Geophysical Research*. – 1979. – Vol. 84. No. B5. – pp. 2348–2350.
18. Hanks T.C., Wyss M. The use of body wave spectra in the determination of seismic source parameters. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1972. – Vol. 62. No. 2. – pp. 561–589.
19. Kennet B.L.N. *Seismological Tables: ak135*. // Research School of Earth Sciences. Australian National University. Australia, Canberra, ACT0200, 2005. – 290 p.
20. Starostenko V., Buryanov V., Makarenko I. et al. Topography of the crust–mantle boundary beneath the Black Sea Basin. // *Tectonophysics*. – 2004. – Vol. 381. – pp. 211–233.

References

1. Aptekman Zh.Ya., Belavina Yu.F., Zakharova A.I., Zobin V.M., Kogan S.Ya., Korchagina O.A., Moskvina A.G., Polikarpova L.A., Chepkunas L.S. P-wave spectra in determining the dynamic parameters of earthquake foci. Transition from a station spectrum to a focal spectrum and calculation of the dynamic parameters of a focal zone. *Volcanology and Seismology*. 1989. No. 2. pp. 66–79. (In Russ.)
2. Aptikaev F.F. About GSZ maps in acceleration units. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 95–103. DOI: 10.46698/VNC.2021.24.94.008. (In Russ.)
3. Balakina L.A., Vvedenskaya A.V., Golubeva N.V., Misharina L.A., Shirokova E.I. The Earth's elastic stress field and focal mechanism. Moscow. Nauka. 1972. 198 p. (In Russ.)
4. Vvedenskaya A.V. Studies of stresses and ruptures in earthquake foci using dislocation theory. Moscow. Nauka. 1969. 136 p. (In Russ.)
5. *Geology of the shelf of the Ukrainian SSR. Tectonics*. Ed. E.F. Shnyukov. Kiev. Naukova Dumka. 1987. 152 p. (In Russ.)
6. *Earthquakes in the USSR in 1985*. Ed. N.V. Kondorskaya. Moscow. Nauka. 1988. 349 p. (In Russ.)
7. Kalinyuk I.V., Svidlova V.S., Bondar M.N., Boyko V.A. Seismicity of Crimea in 2022. *Scientific Notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*. 2023. Vol. 9(75). No. 4. pp. 124–138. (In Russ.)
8. Keilis-Borok V.I. Study of sources approximately equivalent to earthquake foci. *Proceedings of the Geophysical Institute of the USSR Academy of Sciences*. 1959. No. 9(136). pp. 20–42. (In Russ.)
9. Kostrov B.V. Focal mechanism of a tectonic earthquake. Moscow. Nauka. 1975. 176 p. (In Russ.)
10. Kocharyan G.G. *Geomechanics of Faults*. Moscow. GEOS. 2016. 424 p. (In Russ.)
11. Pustovitenko B.G., Panteleeva T.A. Spectral and focal parameters of earthquakes in Crimea. Kiev. Naukova Dumka. 1990. 251 p. (In Russ.)
12. Pustovitenko B.G., Eredzhepov E.E., Bondar M.N. Focal parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region in 2016–2017. *Earthquakes of Northern Eurasia*. 2022. Issue 25 (2016–2017). pp. 242–252. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.22. (In Russ.)
13. Pustovitenko B.G., Eredzhepov E.E., Bondar M.N. Spectral and focal parameters of earthquakes in Crimea in 2022. *Scientific Notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*. 2023. Vol. 9(75). No. 4. pp. 138–155. (In Russ.)
14. Svidlova V.A., Sykchina Z.N., Bondar M.N., Boyko V.A. Seismicity of Crimea in 2016. *Scientific Notes of the V.I. Vernadsky Taurida National University. Series Geography*. 2017. Vol. 3(69). No. 4. pp. 7–50. (In Russ.)

15. Brune I.V. Tectonic stress and the spectrum of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*. 1970. Vol. 75. No. 26. pp. 4997–5009.
16. Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H. Determination of earthquakes source parameters from wave-form data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research*. 1981. Vol. 86. pp. 2825–2852.
17. Hanks T.C., Kanamori H. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*. 1979. Vol. 84. No. B5. pp. 2348–2350.
18. Hanks T.C., Wyss M. The use of body wave spectrum in the determination of seismic source parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1972. Vol. 62. No. 2. pp. 561–589.
19. Kennet B.L.N. *Seismological Tables: ak135*. Research School of Earth Sciences. Australian National University. Australia. Canberra. ACT0200. 2005. 290 p.
20. Starostenko V., Buryanov V., Makarenko I. et al. Topography of the crust–mantle boundary beneath the Black Sea Basin. *Tectonophysics*. 2004. Vol. 381. pp. 211–233.

УДК (550.8.013:504.32):546.296

DOI: 10.46698/VNC.2026.70.83.001

Оригинальная статья

Моделирование плотности потока радона в зависимости от температуры и влажности воздуха (на примере аномальной зоны горы Бештау)

П.А. Сидякин¹, А.А. Барышников¹, И.М. Першин¹, П.С. Микляев²

¹ Пятигорский институт (филиал) Северо-Кавказского федерального университета,
Россия, 357500, г. Пятигорск, ул. Ермолова, 46,
e-mail: sidyakin_74@mail.ru;

² Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Россия, 101000, г. Москва,
Уланский пер., 13, стр. 2, e-mail: peterm7@inbox.ru

Статья поступила: 08.10.2025, доработана: 29.12.2025, принята к публикации: 14.01.2026

Резюме: Актуальность работы. Изучение механизмов переноса радона и выявление аномалий, таких как на горе Бештау (Кавказские Минеральные Воды), где зафиксированы экстремально высокие значения плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта, критически важно для оценки радиационного риска. Основной источник поступления радона в здания – грунты основания здания, особенно в зонах геологических разломов, где возможен конвективный перенос. **Цель исследования.** Целью исследования является разработка математической модели для прогнозирования плотности потока радона на основе метеорологических и других параметров, имеющих потенциальное влияние на поступление радона из горных пород в атмосферный воздух. Исследование направлено на анализ влияния температуры и влажности воздуха на ППР в выявленной радоновой аномалии на западном склоне г. Бештау. **Методы работы.** Для анализа использовались данные измерений ППР, температуры и влажности воздуха, проведенные в период с 2018 по 2020 годы. На основе этих данных методом множественной линейной регрессии был создан прототип математической модели прогнозирования радоновой активности. **Результаты работ.** Разработан прототип математической модели, позволяющий прогнозировать значения ППР по температуре и влажности воздуха с достоверностью около 71 %. Проверка модели на независимых данных показала близкое совпадение прогноза с реальным измеренным значением. Установлено, что для повышения точности прогноза необходимо учитывать дополнительные факторы, такие как атмосферное давление, влажность и температура грунта, а также сейсмическая активность. Начаты работы по интеграции этих параметров в модель. Модель была реализована также и в виде программного обеспечения.

Ключевые слова: радон, гора Бештау, плотность потока радона, радоновая аномалия, регрессионный анализ, моделирование.

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-27-00028 «Исследование механизмов переноса радона в проницаемых зонах земной коры на примере курортного региона Кавказские Минеральные Воды, обладающего уникальными радиационно-экологическими характеристиками. Мониторинг, математическое моделирование, прогнозирование».

Для цитирования: Сидякин П.А., Барышников А.А., Першин И.М., Микляев П.С. Моделирование плотности потока радона в зависимости от температуры и влажности воздуха (на примере аномальной зоны горы Бештау). *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 57-68. DOI: 10.46698/VNC.2026.70.83.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.70.83.001

Original paper

Modeling of radon flux density depending on air temperature and humidity (case study of the anomalous zone of Mount Beshtau)

P.A. Sidyakin¹, A.A. Baryshnikov¹, I.M. Pershin¹, P.S. Miklyaev²

¹ Pyatigorsk Institute (branch) of the North Caucasus Federal University,
46 Ermolova Str., Pyatigorsk 357500, Russian Federation,
e-mail: sidyakin_74@mail.ru;

² Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
13/2 Ulanskiy lane, Moscow 101000, Russian Federation,
e-mail: peterm7@inbox.ru

Received: 08.10.2025, revised: 29.12.2025, accepted: 14.01.2026

Abstract: Relevance. Studying radon transport mechanisms and identifying anomalies, such as on Mount Beshtau (Caucasian Mineral Waters region), where extremely high radon flux density (RFD) values have been recorded, is critically important for assessing radiation risk. The primary source of radon in buildings is its entry from soil, particularly in fault zones where convective transport is most prevalent. **The aim** of the study is to develop a mathematical model for predicting radon flux density based on meteorological and other parameters that potentially influence radon emission from rocks into the atmosphere. The study aims to analyze the influence of air temperature and humidity on the flux density within the identified radon anomaly on the western slope of Mount Beshtau. **Methods.** Data from radon activity, temperature, and humidity measurements taken between 2018 and 2020 were used for the analysis. A prototype mathematical model for predicting radon activity was developed using multiple linear regression. **Results.** A prototype mathematical model was developed that can predict radon activity based on temperature and humidity with a reliability of approximately 71 %. Validation of the model using independent data showed close agreement between the forecast and actual measured values. It was determined that improving prediction accuracy requires incorporating additional factors such as atmospheric pressure, soil moisture, soil temperature, and seismic activity. Work has begun on integrating these parameters into the model. The model has also been implemented as software.

Keywords: radon, Mount Beshtau, radon flux density, radon anomaly, regression analysis, modeling.

Acknowledgments: *The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 24-27-00028 "Investigation of radon transport mechanisms in permeable zones of the Earth's crust using the example of the Caucasian Mineral Waters resort region, which has unique radiation and environmental characteristics. Monitoring, mathematical modeling, forecasting".*

For citation: Sidyakin P.A., Baryshnikov A.A., Pershin I.M., Miklyaev P.S. Modeling of radon flux density depending on air temperature and humidity (case study of the anomalous zone of Mount Beshtau). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 57-68. DOI: 10.46698/VNC.2026.70.83.001

Введение

Радиоактивный газ радон-222 является дочерним продуктом распада радия-226, относящегося к ряду урана-238. По данным современных исследований более половины годовой эффективной дозы населения, обусловлено облучением радоном и его дочерними продуктами распада в зданиях. Радон считается второй после курения причиной развития рака легкого (Руководство ВОЗ по содержанию радона в по-

мещениях: с точки зрения общественного здравоохранения, 2009 г.). В последнее время появились сведения о возможном влиянии радона на когнитивные процессы у подростков [Pulliam et al., 2025]. Основной путь поступления радона в помещения зданий и сооружений – это диффузионный и/или конвективный перенос радона из грунтов (горных пород), лежащих в основании здания. В связи с этим, усилия ученых во всем мире направлены на изучение выделения радона из горных пород [Bena et al., 2024].

Перенос радона в литосфере обусловлен двумя процессами:

- диффузией, развитой на границе раздела сред с разной концентрацией радона, преимущественно на границе литосферы и атмосферы;
- конвективным (адвективным) переносом в трещиноватых проницаемых зонах за счет градиента давления.

В трещиноватых горных породах в зонах разломов конвективный механизм переноса может преобладать. В зонах конвективной разгрузки газов могут формироваться радоновые аномалии, т.е. аномально высокие значения объемной активности радона в грунтовой газе и плотности потока радона с поверхности грунта [Гулябянц, 2011; Маренный и др., 2016; Petermann et al., 2024]. В последние десятилетия разными авторами был выявлен ряд характерных очень мощных радоновых аномалий, связанных, по-видимому, с конвективной циркуляцией атмосферного воздуха в проницаемых зонах горных массивов [Di Carlo et al., 2023; Moreno et al., 2016; Neda et al., 2024; Perrier et al., 2024; Schmidt, 2014; Sundal et al., 2008]. В летний период более холодный и плотный воздух проницаемых зон горного массива, обогащенный радоном, опускается вниз и разгружается у подножия склонов, вытесняя теплый атмосферный воздух. Зимой воздух в горном массиве становится теплее атмосферного, поднимается вверх и разгружается в привершинной части склонов. В результате, у подножия склонов формируются радоновые аномалии с максимумами летом и минимумами зимой, а в привершинной части с обратным сезонным ритмом. Радоновые аномалии, могут обуславливать чрезвычайно высокие значения объемной активности радона в помещениях домов, построенных у подножия и в привершинной части склонов [Di Carlo et al., 2023; Perrier et al., 2024; Sundal et al., 2008]. Относительная распространенность подобных аномалий делает актуальным разработку математических моделей для прогноза поведения радона в подобных аномальных зонах.

По данным проведенных ранее исследований [Miklyaev et al., 2022] на западном склоне горы Бештау (регион Кавказских минеральных вод) в районе Бештаугорской кольцевой дороги была выявлена локальная радоновая аномалия, характеризующаяся крайне высокими значениями плотности потока радона, а также очень сильными сезонными колебаниями данного показателя. В период с 2018 года и по настоящее время на горе Бештау проводятся исследования выделения радона из горного массива, включающие периодические измерения плотности потока радона с поверхности грунта, а также мощности дозы гамма-излучения, удельной активности природных радионуклидов в горных породах, метеорологических параметров. Было установлено, что плотность потока радона на фоновых участках составляет от 100 до 800 мБк/(м²·с), а в зоне выявленной радоновой аномалии на локальном участке периодически 4000–25 000 мБк/(м²·с). Значения объемной активности (ОА) радона в открытом воздухе в аномальной зоне достигали 1540 Бк/м³, что в 100 раз превышает местный фон [Miklyaev et al., 2022]. По результатам радонового мониторинга, проводившегося в течение нескольких лет, в данной аномальной зоне были выявлены мощные сезонные колебания ППР с поверхности грунта. В течение летнего периода регистрировались аномально высокие значения ППР. В холодный период года, когда температура воздуха снижалась ниже +11...+14°C, плотность потока радона резко падала, и

принимала аномально низкие значения, снижаясь в некоторые моменты времени до 15–30 мБк/(м²·с), что примерно в 10–30 раз ниже фоновых значений, характерных для горы Бештау. Сезонный выброс радона в аномальной зоне обусловлен, скорее всего, явлением термоиндуцированной конвекции, описанным выше. В данной статье проведена математическая обработка результатов измерений и моделирование плотности потока радона в зоне аномалии на западном склоне горы Бештау.

Геологическое строение территории

Характерной особенностью региона Кавказских минеральных вод является группа отдельных гор, представляющих собой интрузивные субвулканические диапиры. Интрузии относятся к Эльбрусскому магматическому региону и расположены на пересечении широтного Предкавказского краевого прогиба и меридионально вытянутого Транскавказского тектонического поднятия. Наиболее крупный интрузивный массив – гора Бештау (1401 м над уровнем моря) сложена щелочными гранит-порфирами, трахитами и липаритами, которые в совокупности известны как «бештауниты», характеризующимися повышенными содержаниями урана-238 [Карпенко и др., 2009; Панов, 2023; Титов и др., 2020]. В недрах массива в системе разломов и трещин северо-западного простирания залегают урановые рудные жилы, содержащие от нескольких сотых до нескольких процентов ²³⁸U [Машковцев и др., 2010]. Здесь в период с 1954 г. по 1975 г. проводилась промышленная добыча урана. Продукты выветривания бештаунитов (гравий, дресва со щебнем и более крупными обломками пород) покрывают нижние части склонов и прилегающие территории. По результатам сейсмотектонических исследований [Бондарь, Гордеев, 2022] было уточнено местоположение и современная активность основных разломов, включая три основных типа разломов и систем трещиноватости: а) меридиональную систему, включая главный разлом Бештау, б) диагональную систему северо-западного простирания, содержащую урановые руды, и в) систему кольцевых разломов, которая образовалась на границе магматического массива и вмещающих осадочных пород во время внедрения магмы и последующего общего тектонического поднятия массива, происходившего в плиоцен-четвертичный период. Большинство разломов, особенно ориентированных на северо-запад, отчетливо видны в рельефе в форме впадин и оврагов [Бондарь, Гордеев, 2022]. Выявленная мощная радоновая аномалия приурочена к узлу пересечения разлома северо-западного простирания с кольцевым разломом. Кроме того, по воспоминаниям старожилов недалеко от выявленной аномалии было расположено устье одной из штолен бывшего уранового рудника, ныне полностью ликвидированное и засыпанное (установить точное положение бывшего устья на местности не удалось). В связи с чем не исключено, что система разломов в данном месте соединяется с пространством бывшего уранового рудника.

Материалы и методы исследования

Измерения ППР с поверхности грунтов проводились методом открытой камеры с активированным углем с использованием оборудования из комплекта «КАМЕРА-01», измерения активности радона в угле проводились как с использованием бета-радиометра, входящего в комплект, так и на гамма-спектрометрическом комплексе «Мультирад» в геометрии ИК-63. Диапазон измеряемых значений ППР составляет от 3 до 100000 мБк/(м²·с). Значение температуры среды экспонирования накопительных камер составляет от -15 °С до +40 °С, а относительной влажности воздуха не более 95%, время экспонирования составляло 2–3 ч. Общая неопределенность результатов измерений ППР с поверхности грунта методом открытой камеры, составляет не более ±40% [Маренный и др., 2016]. В аномальной зоне в каждый сеанс измерений

устанавливалось от 3 до 5 накопительных камер, в качестве результата принималось среднее значение.

Измерения температуры и относительной влажности проводились термогигрометром ТКА-ПКМ (20). Диапазон измерений температуры воздуха составляет от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Основная абсолютная погрешность измерений температуры составляет $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Диапазон измерений относительной влажности воздуха составляет от 5% до 98 %. Основная абсолютная погрешность измерений относительной влажности составляет $\pm 3,0\%$. Условия эксплуатации ТКА-ПКМ (20): температура окружающего воздуха от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная влажность воздуха при температуре окружающего воздуха $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до 98%, атмосферное давление от 80 кПа до 110 кПа.

Ежемесячные измерения проводились в период с 2018 г. по 2019 г. В таблице 1 представлены результаты измерений.

Таблица 1 / Table 1

**Измерения параметров на аномалии г. Бештау в период с 2018 г. по 2019 г. /
Measurements of anomaly parameters in Beshtau from 2018 to 2019**

Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$ / Air temperature, $^{\circ}\text{C}$	ППР в аномальной зоне, Бк/($\text{m}^2\cdot\text{s}$) / Radon flux density (RFD), Bq/($\text{m}^2\cdot\text{s}$)	Относительная влажность воздуха, % / Relative air humidity, %	Дата измерения / Date of measurement
-3,00	0,1	75,3	18.01.2018
0,20	0,2	40	15.02.2018
0,10	0,1	70	07.03.2018
3,30	0,1	75	30.03.2018
14,00	1,6	79	10.04.2018
25,00	4,4	66	22.05.2018
28,00	23,9	59	08.07.2018
22,00	11,0	55	12.09.2018
24,50	20,4	30	15.10.2018
8,00	0,1	86	07.12.2018
0,00	0,1	89	30.01.2019
3,00	0,1	92	04.03.2019
-0,20	0,1	70	25.03.2019
3,00	0,0	77	19.04.2019
18,00	4,3	55	15.05.2019
25,00	3,9	53	17.06.2019
22,00	12,6	67	29.07.2019
26,00	9,8	43	19.08.2019
28,00	14,8	43	20.09.2019
10,00	0,1	77	17.10.2019

Анализ результатов измерений показал возможную связь плотности потока радона с температурой и относительной влажностью воздуха. На рисунках 1 и 2 приведены графики колебаний ППР и влажности воздуха и ППР и температуры воздуха соответственно.

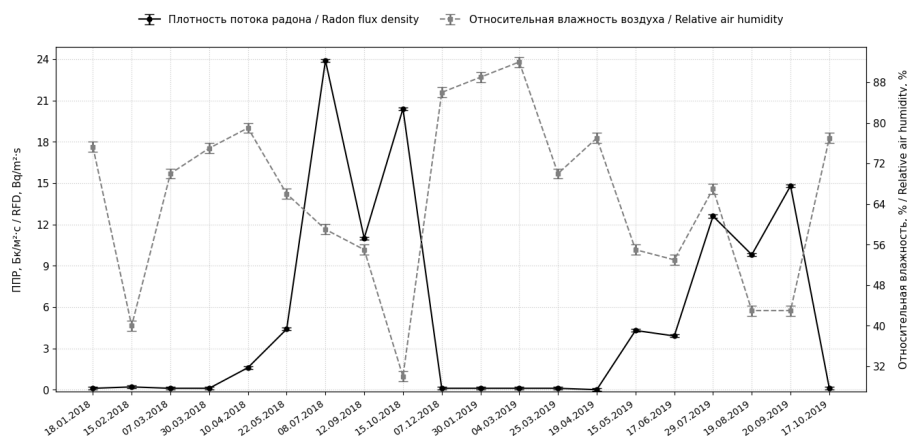


Рис. 1. График плотности потока радона и влажности воздуха на г. Беиштау в период с 18.01.2018 г. по 17.10.2019 г. /

Fig. 1. Graph of radon flux density and air humidity in Beshtau from 18 January 2018 to 17 October 2019

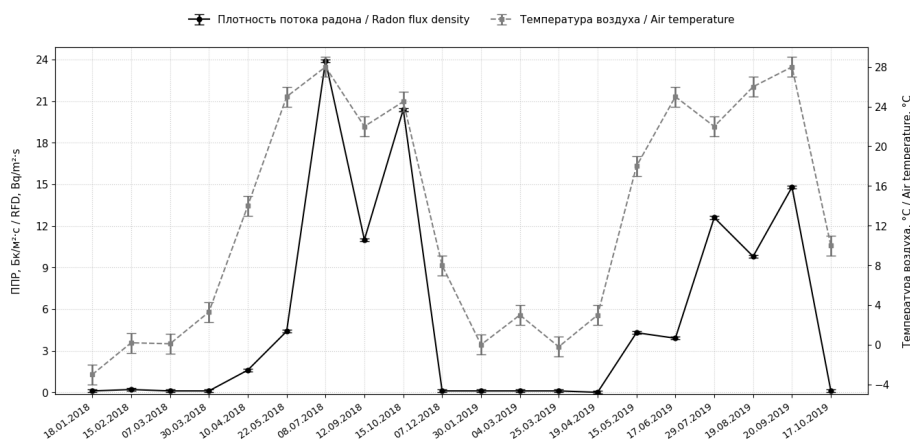


Рис. 2. График плотности потока радона и температуры воздуха на г. Беиштау в период с 18.01.2018 г. по 17.10.2019 г. /

Fig. 2. Graph of radon flux density and air temperature in Beshtau from 18 January 2018 to 17 October 2019

Можно заметить, что сезонные колебания плотности потока радона имеют схожий характер с вариациями температуры воздуха, и почти зеркально отличаются от колебаний влажности воздуха. Корреляционный анализ с применением линейного коэффициента корреляции Пирсона, показал наличие значимых связей между этими параметрами, при этом ППР связан прямой зависимостью с температурой воздуха и обратной с влажностью воздуха. Коэффициенты корреляции приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

**Корреляционная зависимость параметров плотности потока радона с температурой воздуха и плотности потока радона с влажностью /
Correlation between radon flux density and air temperature and radon flux density and humidity**

ППР/температура / Flux Density Parameter/temperature	ППР/влажность Flux Density Parameter/humidity
0.7889166	-0.723992654

Важным вопросом является возможная мультиколлинеарность температуры и влажности воздуха. Как известно, изменение температуры влияет на способность воздуха удерживать влагу, а изменение влажности может влиять на температуру воздуха посредством таких процессов, как конденсация и испарение. В целом, при неизменном атмосферном давлении и количестве влаги в атмосфере (абсолютной влажности) относительная влажность воздуха имеет обратную зависимость от температуры. В природных условиях на относительную влажность оказывают влияние и такие факторы, как атмосферное давление, изменение абсолютного содержания влаги в воздухе и точка росы. Для создания верной математической модели необходимо было исключить влияние мультиколлинеарности на стабильность модели. Были проверены экспериментальные значения параметров измерений на мультиколлинеарность. В результате проверки было обнаружено, что существует обратная корреляция между данными параметрами, что имеет физическое обоснование. Для создания математической модели это не является ограничением, но требует оценки влияния мультиколлинеарности на модель.

Результаты исследований

Необходимость создания математической модели обусловлена возможностью прогнозировать значение плотности потока радона в зависимости от параметров окружающей среды. На данном этапе моделирования таких параметров будет два: температура воздуха и влажность воздуха.

Создание математической модели плотности потока радона было выполнено с помощью множественной линейной регрессии с применением метода наименьших квадратов [Seber, 1977]. В данной математической модели плотность потока радона является зависимой переменной, температура воздуха независимой, а влажность уточняющей переменной к температуре. В построении модели были использованы измерения, полученные в период с 2018 г. по 2019 г. (табл. 1).

В математическом решении были использованы первые пять измерений из таблицы 1, для упрощения вычислений. Итогом решения уравнения станет матрица, содержащая в себе необходимые для создания математической модели коэффициенты b_0 , b_1 , b_2 (b_0 – свободный член; b_1 – коэффициент влажности воздуха; b_2 – коэффициент температуры воздуха). С помощью формулы регрессионного анализа и полученных коэффициентов можно получить прогноз плотности потока радона на основе данных о температуре воздуха и влажности воздуха.

Для проверки стабильности полученной математической модели в расчеты программы был также добавлен фактор инфляции дисперсии [Belsley et al., 2005]. Данный фактор позволяет оценивать степень влияния мультиколлинеарности во множественной линейной регрессии. Формула расчета фактора инфляции дисперсии представлена на формуле 1.

$$VIF(X_j) = \frac{1}{1-R_j^2} \quad (1)$$

Для полученной математической модели данный фактор имеет значение около 1.3, что указывает на слабое влияние мультиколлинеарности на модель. Влияние мультиколлинеарности на стабильность модели происходит при значении фактора инфляции дисперсии в 5 единиц и более.

При расчетах были использованы всего пять значений измерений, что достаточно мало для создания даже прототипа математической модели. При использовании большего количества значений расчеты получаются слишком большими. В связи с этим было решено создать программное обеспечение для оценки плотности потока радона с поверхности грунта, исходя из известных параметров окружающей среды.

Программное обеспечение для оценки плотности потока радона разрабатывается на языке программирования Kotlin с применением библиотеки для математических расчетов “Apache”. Данный язык программирования был выбран не случайно, его инструментарий позволяет разработать программное обеспечение, которое будет иметь совместимость с большинством операционных систем.

Для хранения большого количества измерений была создана база данных. Она позволяет вносить данные в программу без ее редактирования и в будущем позволит передавать данные с измерительных датчиков напрямую в программу. База данных была разработана с применением PostgreSQL. Измерения вносились в базу в следующем формате: дата измерения; плотность потока радона; влажность воздуха; температура воздуха. При необходимости через базу данных можно добавить новые параметры для измерения.

При проведении регрессионного анализа в программу вносятся 15 значений измерений ППР, температуры и влажности воздуха. Используя полученные данные (в период с 2018 по 2019 гг.), были вычислены свободный член (intercept), коэффициент влажности воздуха и коэффициент температуры воздуха. По данным значениям, был проведен прогноз. Прогнозирование плотности потока радона производится с помощью внесения в программу данных о температуре воздуха и влажности воздуха.

Чтобы проверить достоверность прогнозирования была применена следующая стратегия – на вход программы подавались данные 15 значений измерений, после чего для прогнозирования также вносились влажность воздуха, и температура воздуха, при которых был необходим прогноз плотности потока радона. Важный момент в том, что данные о температуре и влажности воздуха брались из 16-го по порядку измерения, которое не участвовало при создании модели. Это позволит сравнить значение, полученное при прогнозировании плотности потока радона с реальным значением, полученным при измерении. Сравнив эти данные, можно также сделать выводы о точности описания математической моделью реального объекта.

Результаты прогнозирования позволяют сделать несколько важных выводов. Прототип математической модели получился достаточно достоверным для экспериментального исследования, около 71 % коэффициент детерминации. Результат прогнозирования получился около 10 МБк/(м²·с), в то время как реальное значение около 12 МБк/(м²·с).

При верификации модели пришлось столкнуться с несколькими проблемами. Используемые данные являются, по-видимому, наиболее типичными среди многолетних измерений, соответственно, использование других данных снижает достоверность модели. Также проблемой стало ограниченное количество параметров измерений. Для дальнейшего анализа и создания динамической модели необходимо более глубоко исследовать факторы, имеющие влияние на плотность потока радона. Дальнейшая работа будет направлена на поиск решений проблемы верификации математической модели для оценки плотности потока радона с поверхности грунта.

Важно отметить, что аналогичные сезонные радоновые аномалии, расположенные у основания склонов горных массивов в последние десятилетия были выявлены разными авторами в разных геологических и климатических условиях. Подобные аномалии связываются с конвективной циркуляцией атмосферного воздуха в пронизываемых зонах горных массивов. В этой связи очень важен опыт разработки моделей поведения радона в подобных аномальных зонах. Интенсивность конвективного переноса радона в горном массиве напрямую связана с колебаниями температуры воздуха, т.к. этот параметр определяет перепад температуры между горным массивом и окружающей средой. Влажность воздуха, может оказывать существенное влияние на конвективный перенос радона за счет конденсации влаги на аэрозолях, содержащих-

ся в воздухе, что сложным образом изменяет параметры среды, в том числе, плотность воздушной смеси.

Вместе с тем, как показали результаты моделирования, для точного прогноза недостаточно учёта только температуры и влажности воздуха. В ходе измерений были зафиксированы существенно различающиеся значения ППР при схожих значениях температуры и влажности. Это указывает на наличие других факторов, влияющих на конвективный перенос радона в горном массиве, не учтенных в модели. Такими факторами могут быть колебания содержания аэрозолей в воздушно-газовой смеси, циркулирующей в трещинах, влажности поверхностного слоя грунта, вариаций атмосферного давления, влияние неравномерного нагрева склонов горы разной экспозиции. Кроме указанных факторов, на выброс радона может влиять изменение напряженно-деформированного состояния массива пород за счет сейсмического воздействия. Примеры влияния сейсмической активности на колебания содержания радона в грунтовой воздухе в зонах разломов приведены во многих работах [Бобров, 2016; Заалишвили и др., 2022; Tallini et al., 2025]. Возможное влияние данных факторов накладывает определенные ограничения и пока что затрудняет и верификацию предложенной математической модели.

Выводы

По результатам проведенных исследований была предложена математическая модель для прогнозирования плотности потока радона с поверхности грунта в аномальных зонах, на примере горы Бештау. В качестве независимых переменных использовались температура и влажность воздуха – параметры, которые могут оказывать влияние на плотность потока радона. Установлена тесная прямая корреляционная связь между плотностью потока радона и температурой, и обратная – между ППР и влажностью воздуха.

В результате исследования был разработан прототип математической модели для прогнозирования плотности потока радона с достоверностью около 71 %. Данная модель была реализована с помощью множественной линейной регрессии с применением метода наименьших квадратов. Параметры, использованные при построении модели, имеют корреляционную зависимость, поэтому модель было необходимо проверить на стабильность. В ходе оценки было выявлено, что мультиколлинеарность параметров не оказывает значительного влияния на математическую модель, что подтверждает стабильность модели. На основании математической модели было разработано программное обеспечение для прогнозирования плотности потока радона на основании метеорологических измерений.

Литература

1. Бобров А.А. К вопросу о сейсмической активности и поле радона в Приольхонье (Западное Прибайкалье). // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2016. – № 3(56). – С. 76–85. DOI: 10.21285/0130-108X-2016-56-3-76-85.
2. Бондарь И.В., Гордеев Н.А. Новейшее напряженно-деформированное состояние южного борта Кандалакшского грабена. // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2022. – Т. 86. № 6. – С. 870–882. DOI: 10.31857/S2587556622060036.
3. Гулябянц Л.А. Новый подход к решению проблемы защиты зданий от радона. // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3-2. – С. 3–8.
4. 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.

5. Карпенко Е.И., Санжарова Н.И., Спиридонов С.И., Серебряков И.С. Радиоэкологическая обстановка в районе размещения бывшего уранодобывающего предприятия ЛПО «Алмаз». // Радиация и риск. – 2009. – Т. 18. № 4. – С. 73–81.
6. Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: «Перо», 2016. – 394 с.
7. Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К., Шумилин Н.В., Щеточкин В.Н. Уран Российских недр. М.: ВИМС, 2010. – 850 с.
8. Панов А.В. Радиоэкологические проблемы в районе размещения Лермонтовского предприятия «Алмаз» по добыче и переработке урановой руды. Обзор. // Радиация и риск. – 2023. – Т. 32. № 1. – С. 131–153. DOI: 10.21870/0131-3878-2023-32-1-131-153.
9. Титов А.В., Шандала Н.К., Исаев Д.В., Семенова М.П., Серегин В.А., Бельских Ю.С., Остапчук Т.В., Чернобаев А.С. Оценка радиационной опасности пребывания населения и ведения хозяйственной деятельности в районе расположения выработанного уранового месторождения. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2020. – Т. 65. № 2. – С. 11–16.
10. Belsley D.A., Kuh E., Welsch R.E. Regression diagnostics: Identifying influential data and sources of collinearity. New York: John Wiley & Sons, 2005. – 320 p.
11. Bena E., Ciotoli G., Petermann E., Bossew P., Ruggiero L., Verdi L., Huber P., Mori F., Mazzoli C., Sassi R. A new perspective in radon risk assessment: Mapping the geological hazard as a first step to define the collective radon risk exposure. // Science of The Total Environment. – 2024. – Vol. 912. – Art. No. 169569. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169569.
12. Di Carlo C., Ampollini M., Antignani S., Caprio M., Carpentieri C., Caccia B., Bochicchio F. Extreme reverse seasonal variations of indoor radon concentration and possible implications on some measurement protocols and remedial strategies. // Environmental Pollution. – 2023. – Vol. 327. – Art. No. 121480. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121480.
13. Miklyaev P.S., Petrova T.B., Shchitov D.V., Sidiyakin P.A., Murzabekov M.A., Tsebro D.N., Marennyy A.M., Nefedov N.A., Gavriliev S.G. Radon transport in permeable geological environments. // Science of the Total Environment. – 2022. – Vol. 852. – Art. No. 158382. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158382.
14. Moreno V., Bach J., Font L., Baixeras C., Zarroca M., Linares R., Roque C. Soil radon dynamics in the Amer fault zone: an example of very high seasonal variations. // Journal of Environmental Radioactivity. – 2016. – Vol. 151. Pt. 1. – pp. 293–303. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2015.10.018.
15. Neda T., Dosa A. Seasonal variations of radon activity concentration in mofettes from Harghita and Covasna Counties, Romania. // Journal of Environmental Radioactivity. – 2024. – Vol. 273. – Art. No. 107389. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2024.107389.
16. Perrier F., Bourges F., Girault F., Lartiges B., Bonnet S., Genty D., Denele Y., Regard V., Regnier E., Bouquerel H., Lei Bo, Rivet Th., Losno R. Radon-222 signatures of atmospheric dynamics in the Pech Merle Painted Cave, France: Consequences for management and conservation. // Science of The Total Environment. – 2024. – Vol. 949. – Art. No. 174648. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174648.
17. Petermann E., Bossew P., Kemski J., Gruber V., Suhr N., Hoffmann B. Development of a high-resolution indoor radon map using a new machine learning- based probabilistic model and German radon survey data. // Environmental Health Perspectives. – 2024. – Vol. 132. Issue 9. – Art. No. 97009. DOI: 10.1289/EHP14171.
18. Pulliam H.R., Embury C.M., Rempe M.P., Okelberry H.J., Rice D.L., Coutant A.T., Glesinger R., Wilson T.W., Taylor B.K. Chronic radon exposure is associated with developmental alterations to neural and behavioral indices of cognitive control. // NeuroImage. – 2025. – Vol. 321. – Art. No. 121524. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2025.121524.
19. Schmidt P. Proof of the radiological remediation success at former uranium mining and milling sites (WISMUT sites) in Germany. In: 4th Europ. IRPA Congr. Geneve, Switzerland. June 23–27, 2014.
20. Seber G.A.F. Linear regression analysis. New York: Wiley and Sons, 1977. – 465 p.
21. Sundal A.V., Valen V., Soldal O., Strand T. The influence of meteorological parameters on soil radon levels in permeable glacial sediments. // Science of The Total Environment. – 2008. – Vol. 389. Issues 2–3. – pp. 418–428. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.09.001.
22. Tallini M., Guerriero V., Nyberg A.A., Wyss R. et al. Selection of hydrosensitive to seismicity sites for radon monitoring in the Abruzzo aquifers (central Italy) within the European

ArtEmis project. // Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C. – 2025. – Vol. 141. Pt. 2. – Art. No. 104127. DOI: 10.1016/j.pce.2025.104127.

References

1. Bobrov A.A. To seismic activity and radon field in Priolkhonie (Western Baikal region). Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits. 2016. No. 3(56). pp. 76–85. DOI: 10.21285/0130-108X2016-56-3-76-85. (In Russ.)
2. Bondar I.V., Gordeev N.A. The Neotectonic Stress–Strain State of the Southern Side of the Kandalaksha Graben. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2022. Vol. 86. No. 6. pp. 870–882. DOI: 10.31857/S2587556622060036. (In Russ.)
3. Gulabyants L.A. A new approach to solving the problem of protecting buildings from radon. *Vestvik MGSU*. 2011. No. 3-2. pp. 3–8. (In Russ.)
4. 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. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 35–50. DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003. (In Russ.)
5. Karpenko E.I., Sanzharova N.I., Spiridonov S.I., Serebryakov I.S. Radioecological situation in the area of the former “Almaz” uranium mining enterprise. *Radiation and Risk*. 2009. Vol. 18. No. 4. pp. 73–81. (In Russ.)
6. Marennyy A.M., Tsapalov A.A., Miklyaev P.S., Petrova T.B. Patterns of formation of the radon field in the geological environment. Moscow. Pero. 2016. 394 p. (In Russ.)
7. Mashkovtsev G.A., Konstantinov A.K., Miguta A.K., Shumilin N.V., Shchetochkin V.N. Uranium of the Russian subsoil. Moscow. VIMS. 2010. 850 p. (In Russ.)
8. Panov A.V. Radioecological problems in the site of the former Lermontov Production Association “Almaz” for mining and processing of uranium ore. Review. *Radiation and Risk*. 2023. Vol. 32. No. 1. pp. 131–153. DOI: 10.21870/0131-3878-2023-32-1-131-153. (In Russ.)
9. Titov A.V., Shandala N.K., Isaev D.V., Semenova M.P., Seregin V.A., Belskikh Yu.S., Ostapchuk T.V., Chernobaev A.S. Assessment of the Public Radiation Protection and Economic Activity Safety in the Area of the Developed Uranium Deposit. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2020. Vol. 65. No. 2. pp. 11–6. (In Russ.)
10. Belsley D.A., Kuh E., Welsch R.E. Regression diagnostics: Identifying influential data and sources of collinearity. New York. John Wiley & Sons. 2005. 320 p.
11. Bena E., Ciotoli G., Petermann E., Bossew P., Ruggiero L., Verdi L., Huber P., Mori F., Mazzoli C., Sassi R. A new perspective in radon risk assessment: Mapping the geological hazard as a first step to define the collective radon risk exposure. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 912. Art. No. 169569. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169569.
12. Di Carlo C., Ampollini M., Antignani S., Caprio M., Carpentieri C., Caccia B., Boichichio F. Extreme reverse seasonal variations of indoor radon concentration and possible implications on some measurement protocols and remedial strategies. *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 327. Art. No. 121480. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121480.
13. Miklyaev P.S., Petrova T.B., Shchitov D.V., Sidiyakin P.A., Murzabekov M.A., Tsebro D.N., Marennyy A.M., Nefedov N.A., Gavriliev S.G. Radon transport in permeable geological environments. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 852. Art. No. 158382. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158382.
14. Moreno V., Bach J., Font L., Baixeras C., Zarroca M., Linares R., Roque C. Soil radon dynamics in the Amer fault zone: an example of very high seasonal variations. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016. Vol. 151. Pt. 1. pp. 293–303. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2015.10.018.
15. Neda T., Dosa A. Seasonal variations of radon activity concentration in mofettes from Harghita and Covasna Counties, Romania. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2024. Vol. 273. Art. No. 107389. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2024.107389.
16. Perrier F., Bourges F., Girault F., Lartiges B., Bonnet S., Genty D., Denele Y., Regard V., Regnier E., Bouquerel H., Lei Bo, Rivet Th., Losno R. Radon-222 signatures of atmospheric dynamics in the Pech Merle Painted Cave, France: Consequences for management and conservation. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 949. Art. No. 174648. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174648.
17. Petermann E., Bossew P., Kemske J., Gruber V., Suhr N., Hoffmann B. Development of a high-resolution indoor radon map using a new machine learning- based probabilistic model

and German radon survey data. *Environmental Health Perspectives*. 2024. Vol. 132. Issue 9. Art. No. 97009. DOI: 10.1289/EHP14171.

18. Pulliam H.R., Embury C.M., Rempe M.P., Okelberry H.J., Rice D.L., Coutant A.T., Glesinger R., Wilson T.W., Taylor B.K. Chronic radon exposure is associated with developmental alterations to neural and behavioral indices of cognitive control. *NeuroImage*. 2025. Vol. 321. Art. No. 121524. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2025.121524.

19. Schmidt P. Proof of the radiological remediation success at former uranium mining and milling sites (WISMUT sites) in Germany. In: 4th Europ. IRPA Congr. Geneve, Switzerland. June 23–27. 2014.

20. Seber G.A.F. *Linear regression analysis*. New York. Wiley and Sons. 1977. 465 p.

21. Sundal A.V., Valen V., Soldal O., Strand T. The influence of meteorological parameters on soil radon levels in permeable glacial sediments. *Science of The Total Environment*. 2008. Vol. 389. Issues 2–3. pp. 418–428. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.09.001.

22. Tallini M., Guerriero V., Nyberg A.A., Wyss R. et al. Selection of hydrosensitive to seismicity sites for radon monitoring in the Abruzzo aquifers (central Italy) within the European ArtEmis project. *Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C*. 2025. Vol. 141. Pt. 2. Art. No. 104127. DOI: 10.1016/j.pce.2025.104127.

УДК 622.83; 550.343

DOI: 10.46698/VNC.2026.87.99.001

Оригинальная статья

Изучение сигналов электромагнитного излучения при разрушении образцов известняка в процессе их одноосного нагружения

А.Ф. Шестаков[✉], Д.С. Тягунов[✉]

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН,
Россия, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, e-mail: tds-07@mail.ru

Статья поступила: 31.10.2025, доработана: 10.03.2026, принята к публикации: 13.03.2026

Резюме: Актуальность работы. В настоящее время достаточно широко проводятся экспериментальные исследования электромагнитного излучения (ЭМИ), регистрируемого в процессе трещинообразования и разрушения образцов горных пород и различных материалов под воздействием внешней нагрузки. При этом, большинство публикаций по этой теме посвящено изучению сигналов электромагнитного поля высокочастотного диапазона. В лабораторных экспериментах крайне редко применяются методы регистрации ЭМИ, генерируемого в процессе нагружения образцов горных пород в ультранизкочастотном (УНЧ) диапазоне, с целью поиска закономерностей появления информативных сигналов в электромагнитном поле, которые можно использовать в качестве индикаторов разрушения. Особенно остро эта задача возникает, когда они соизмеримы с уровнем шумов техногенного происхождения. В этой связи, физическое моделирование процессов разрушения на образцах горных пород является актуальным для изучения деструктивных процессов в геологической среде, порождающих низкочастотное ЭМИ, а также для исследования возможных механизмов его генерации. **Цель исследований** – выявить особенности проявления малоамплитудных УНЧ сигналов ЭМИ на фоне техногенного магнитного шума, регистрируемых магнитомодуляционным преобразователем магнитной индукции в процессе разрушения двух образцов горной породы, отличающихся по своим свойствам и минералогическому составу, а также рассмотреть возможные причины и факторы, влияющие на их характеристики. **Методы исследования:** лабораторный эксперимент по регистрации сигналов магнитной индукции при воздействии внешней нагрузки на образцы горной породы; программная обработка данных с применением полосового фильтра низких частот на основе дискретного преобразования Фурье; выявление и анализ информативных УНЧ сигналов ЭМИ в диапазоне 0.01–45 Гц и их сопоставление с графиком нагрузки. **Результаты.** Проведено исследование характерных особенностей сигналов ЭМИ в диапазоне 0.01–45 Гц, генерируемого образцами известняка при одноосном их нагружении, создаваемом ручным гидравлическим прессом в лабораторном эксперименте. Рассмотрена методика выявления УНЧ сигналов ЭМИ, возникающего при воздействии внешней нагрузки для двух различных образцов известняка на фоне магнитного шума техногенного происхождения, а также возможные факторы, влияющие на их характеристики, такие как прочность, состав и микроструктура образцов.

Ключевые слова: магнитомодуляционный преобразователь, магнитная индукция, разрушение образцов горных пород, электромагнитное излучение, техногенный магнитный шум.

Для цитирования: Шестаков А.Ф., Тягунов Д.С. Изучение сигналов электромагнитного излучения при разрушении образцов известняка в процессе их одноосного нагружения. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 69–79. DOI: 10.46698/VNC.2026.87.99.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.87.99.001

Original paper

Research of electromagnetic emission signals during the destruction of limestone samples under uniaxial loading

A.F. Shestakov^{ORCID}, D.S. Tyagunov^{ORCID}

Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg 620016, 100 Amundsen Str., Russian Federation,
e-mail: tds-07@mail.ru

Received: 31.10.2025, revised: 10.03.2026, accepted: 13.03.2026

Abstract: Relevance. At present, experimental studies of electromagnetic emission (EME) recorded in the process of destruction of rock samples and various materials under the influence of external load are quite widespread. However, most publications on this topic are devoted to the study of high-frequency electromagnetic field signals. In laboratory experiments, methods of recording EME generated during loading of rock samples in the ultra-low frequency (ULF) range are extremely rarely used in order to search for regularities of the appearance of informative signals in the electromagnetic field, which can be used as indicators of destruction. This task is especially acute when these signals are comparable to technogenic noise levels. In this regard, physical modeling of destruction processes on rock samples is relevant for the study of destructive processes in the geological environment that generate low-frequency ULF, as well as for investigating the possible mechanisms of its generation. **Aim** of the study – to identify the appearing features of low-amplitude ULF EME signals against the background of technogenic magnetic noise recorded by the magnetic modulation transducer of magnetic induction in the process of destruction of two rock samples that differ in their properties and mineralogical composition, as well as to consider possible causes and factors affecting their characteristics. **Methods:** laboratory experiment to record magnetic induction signals under the influence of an external load on rock samples; software data processing using a low-pass bandpass filter based on the discrete Fourier transformation; detection and analysis of informative ULF EME signals in the range 0.01–45 Hz and their comparison with the load graph. **Results.** A study of the characteristic features of EME signals in the 0.01–45 Hz range generated by limestone samples under their uniaxial loading created by a manual hydraulic press in a laboratory experiment was carried out. A method for detecting ULF EME signals generated by external loading on two different limestone samples against a background of technogenic magnetic noise was considered, as well as possible factors affecting their characteristics, such as strength, composition, and microstructure of the samples.

Keywords: magnetomodulation transducer, magnetic induction, destruction of rock samples, electromagnetic emission, technogenic magnetic noise.

For citation: Shestakov A.F., Tyagunov D.S. Research of electromagnetic emission signals during the destruction of limestone samples under uniaxial loading. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 69–79. DOI: 10.46698/VNC.2026.87.99.001

Введение

Известно, что к настоящему времени насчитывается около двухсот природных явлений, предваряющих или вызываемых землетрясениями, среди которых фундаментальная роль отводится изучению процессов, связанных с изменением напряженно-деформированного состояния горных пород [Заалишвили и др., 2022].

Сейчас можно считать установленным, что электромагнитное излучение (ЭМИ) является одним из индикаторов деструктивных процессов, протекающих в геологи-

ческой среде и обусловленных изменением напряженно-деформированного состояния, наряду с акустической эмиссией и вариационными аномалиями, вызванными миграцией радиогенных газов, приуроченными к очагу разрушения [Курленя и др., 2000; Соболев, Пономарев, 2003; Заалишвили и др., 2022].

Для изучения особенностей поведения горных пород с позиций поиска критериев прогнозирования геодинамических явлений важную роль отводят лабораторным экспериментам, в которых моделируются эти процессы на образцах горных пород и различных композиционных материалов. При этом существенное внимание уделяется регистрации и изучению сигналов ЭМИ, генерируемого образцами при их трещинообразовании и разрушении в результате приложения к ним внешней нагрузки [Курленя и др., 2000; Соболев, Пономарев, 2003; Лось и др., 2010; Вострецов и др., 2013].

Следует отметить, что в преобладающем большинстве таких экспериментов наблюдаются и исследуются сигналы ЭМИ в высоко- и радиочастотном диапазонах, хотя низкочастотное, а особенно ультранизкочастотное (УНЧ) ЭМИ обладает тем преимуществом, что оно распространяется на большие расстояния от очага готовящегося геодинамического события вследствие меньшего поглощения в геологической среде [Сурков, 2000].

Актуальность изучения УНЧ ЭМИ, предвещающего геодинамические события, обусловлена еще и тем, что накоплен и опубликован большой материал экспериментальных данных по возрастанию ультранизкочастотных сигналов магнитной индукции, наблюдаемых от нескольких часов и дней до начала землетрясений в частотном диапазоне 0.01–40 Гц на расстояниях от десятков до сотен километров [Park et al., 1993; Сурков, 2000; Матюков, 2011; Shrivastava, 2014; и др.].

Ранее авторами были проведены лабораторные эксперименты по регистрации высокоамплитудных УНЧ сигналов ЭМИ и изучены их спектральные характеристики на примере разрушения образца базальта, способного хорошо накапливать энергию деформации под воздействием внешней нагрузки, перед тем как наступит критическая стадия его хрупкого разрушения, сопровождающаяся ЭМИ [Tyagunov, Shestakov, 2024]. В этом эксперименте используемый образец относился к скальной магматической породе, обладающей высоким пределом прочности на одноосное сжатие [Мащенко и др., 2014], вследствие чего его разрушение сопровождалось генерацией высокоамплитудных УНЧ сигналов ЭМИ, значительно превосходящих уровень флуктуаций техногенного магнитного шума в месте проведения эксперимента и их идентификация не вызвала особых затруднений. Что касается малоамплитудных сигналов, то для их выделения была предложена соответствующая методика [Шестаков, Тягунов, 2025], которая позволила выявить такие информативные сигналы и установить их характерные особенности.

Естественно, что сигналы ЭМИ для разных горных пород могут быть различны [Вострецов и др., 2013; Xiaoan et al., 2018]. С одной стороны, на них влияют внешние факторы, такие как способ нагрузки, условия эксперимента и т.д. С другой стороны, они зависят от свойств горной породы, например, физических и механических.

В данной статье исследованы характерные особенности выделения сигналов ЭМИ, по-разному проявляющихся от одного типа образцов горных пород при их одноосном нагружении с применением ручного гидравлического пресса в лабораторном эксперименте, а также рассмотрены возможные причины и факторы, связанные с этим различием (микроструктура, прочность, состав образцов).

Целью настоящей работы является изучение проявления информативных малоамплитудных УНЧ сигналов ЭМИ на фоне флуктуаций техногенного магнитного шума с применением магнитомодуляционного преобразователя для регистрации

компонент магнитной индукции в процессе разрушения двух образцов известняка, отличающихся по своим физико-механическим свойствам и минералогическому составу. Это позволит полнее верифицировать УНЧ ЭМИ как индикатора процессов разрушения в геологической среде, пригодного для выработки прогностических критериев при изучении состояния массивов горных пород в условиях естественно-го залегания и возможных механизмов его генерации, сопутствующих геодинамическим явлениям.

Методы исследования

Для регистрации сигналов ЭМИ был применен трехкомпонентный магнитомодуляционный преобразователь магнитной индукции (ММПМИ), выполненный на основе аморфных ферромагнитных сердечников с компенсированной продольной магнитострикцией и частотным диапазоном 0.01÷200 Гц [Сокол-Кутыловский, 2022]. Чувствительность ММПМИ (~1 пТл и менее) позволяет его использовать при изучении характеристик УНЧ электромагнитных сигналов и особенностей их проявления в магнитном поле вследствие различных причин природного или техногенного происхождения, связанных с разрушением горных пород.

В эксперименте измерялись амплитуды взаимно ортогональных горизонтальных компонент магнитной индукции: B_x , B_y , одна из них имела направление по магнитному меридиану. Система ММПМИ, жестко зафиксированная на немагнитном штативе, была установлена на расстоянии ~450 мм от образца.

Нагружение образцов осуществлялось при помощи ручного гидравлического одноосного пресса марки WK-18 (ZARZAD SPRZETU, Польша) с классом точности 0.5, рассчитанного на максимальную нагрузку 100 тонн. Запись режимов нагружения образцов осуществлялась на цифровую видеокамеру SONY Handycam HDR-XR160E. Более детально характеристики аппаратуры и методика проведения измерений описаны в [Сокол-Кутыловский, 2022; Tyagunov, Shestakov, 2024].

Образцы известняка кубической формы (далее «Варна 1» и «Варна 2») с ребрами 23 мм были отобраны с разреза «Варна», который относится к Тогузак-Аятской свите и проходит по правому берегу р. Нижний Тогузак, что в 2 км южнее пос. Варна Челябинской области [Свяжина и др., 2003].

Для изучения возможного влияния различных факторов на генерацию ЭМИ испытуемые образцы после их разрушения подверглись минералогическому (рентгенофазовому) анализу. Этот анализ проводился по основным рефлексам с применением методики идентификации фазового состава горных пород и минералов № 88-16360-119-01.00076-2011 с использованием дифрактометра XRD-7000 фирмы «Shimadzu» (Отчет № 10Н-2025 о выполненных аналитических работах в ЦКП «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН / отв. исполнитель – к.г.-м.н. М.С. Глухов).

В отличие от образца, использованного в работе [Tyagunov, Shestakov, 2024], выбор этих образцов был обусловлен тем, что осадочные породы обладают низким пределом прочности [Флоренский и др., 2003] на одноосное сжатие, а значит, накопление энергии деформации в процессе внешней нагрузки, перед тем как наступит критическая стадия его полного разрушения, может сопровождаться сигналами ЭМИ малой амплитуды. Подобные особенности были также отмечены при регистрации высокочастотного импульсного ЭМИ, генерируемого при разрушении образцов горных пород в лабораторных экспериментах [Курленя и др., 2000; Вострецов и др., 2013]. Также, в работе [Вострецов и др., 2013] отмечается, что для образцов мраморизованного известняка, принадлежащих к «пластичным» породам характерно «спокойное» развитие процесса разрушения с достаточно плавным падением нагрузки.

Результаты и обсуждение

После фиксации образцов между плитами гидравлического пресса на них непрерывно оказывали нагрузку в виде одноосного сжатия, при которой плавно увеличивалось давление до их полного разрушения. На образец «Варна 1» весом 30 г нагрузка увеличивалась от 0 МПа до 0.8 МПа, «Варна 2» весом 35 г – от 0 МПа до 2.2 МПа.

Следует отметить, что согласно работам [Лось и др., 2010; Chengwu et al., 2018] при проведении в лабораторных экспериментах регистрации УНЧ сигналов ЭМИ необходимо учитывать техногенный магнитный шум, особенно, если регистрируемый сигнал близок или сопоставим с ним по амплитуде. Поскольку значения измеряемых сигналов оказались ниже уровня магнитного шума, то для их выделения был применен полосовой фильтр низких частот (ФНЧ), реализованный в виде программы на языке Borland Delphi 7, использующей дискретное преобразование Фурье. С помощью ФНЧ все частоты выше 45 Гц были срезаны.

На рисунке 1 представлены результаты экспериментов после программной обработки. Начало нагружения образцов на магнитограммах и графике нагрузки соответствует 10-й секунде, окончание – 75-й секунде (рис. 1, а) и 85-й секунде (рис. 1, с).

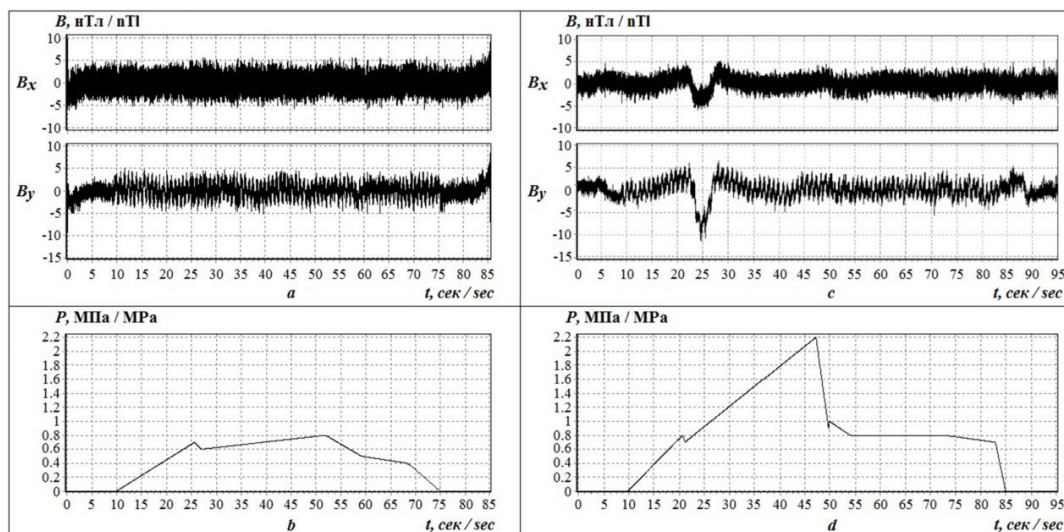


Рис. 1. Записи вариаций техногенного магнитного шума и УНЧ сигналов ЭМИ в полосе пропускания 0.01–45 Гц (а, с) и графики нагрузки (b, d) /

Fig. 1. Recordings of variations in technogenic magnetic noise and ULF signals EM emission in the 0.01–45 Hz bandwidth (a, c) and the load graphs (b, d)

Перед регистрацией сигналов ЭМИ в процессе нагружения образцов, а также после их разрушения на магнитограммах и графике нагрузки записаны соответственно (до и после) 10-ти секундные интервалы фоновой записи вариаций магнитного шума (рис. 1 а, рис 1 с) для оценки его интенсивности.

Согласно представленным результатам (рис. 1, а) при нагружении образца «Варна 1» на записях магнитограмм сигналы ЭМИ не проявились при возрастании и спаде нагрузки, пиковое значение которой составило 0.8 МПа (рис. 1, b).

При воздействии внешней нагрузки на образец «Варна 2», сигнал ЭМИ на записях магнитограмм (рис. 1, с) проявляется на начальной стадии его нагружения. После 5-й секунды интенсивность ЭМИ начинает возрастать с увеличением нагрузки. Следует отметить, что по характеру проявления амплитуда сигнала в процессе нагрузки изменяется плавно, а его длительность соответствует интервалу 20 секунд. На 21-й секунде графика нагрузки (рис. 1, d) информативный сигнал становится более

выраженным и достигает своего максимума примерно через 4 секунды, что соответствует 25-й секунде на магнитограммах (рис. 1, *c*). Вероятно, это связано с тем, что в образце происходит формирование и слияние микротрещин, что отразилось в виде незначительного скачка на графике нагрузки (рис. 1, *d*).

Далее, согласно графику (рис. 1, *d*), ее рост продолжается до 2.2 МПа, а интенсивность ЭМИ падает, что говорит о завершении процесса ее возможной генерации зарядами, возникающими на бортах образовавшихся макротрещин и их миграцией [Wang, He, 2000]. После 47-й секунды образец теряет свои прочностные свойства, и нагрузка с 2.2 МПа плавно падает до 0 МПа (рис. 1, *d*). Это может быть обусловлено перераспределением накопленной энергии деформации в поверхностную энергию, связанную с возникновением системы образовавшихся трещин в процессе воздействия внешней нагрузки на образец [Беликов, Шестаков, 2008].

Сравнивая результаты экспериментов рисунка 1 можно отметить, что структура и текстура этих образцов оказывает значительное влияние на характеристики сигналов ЭМИ. Образец «Варна 1» оказался более пластичным по своей структуре и менее способным накапливать упругую энергию деформации из-за слабых прочностных свойств. Это не способствует развитию микротрещин в объеме образца, а также образованию макротрещин, порождающих УНЧ сигналы ЭМИ. При нагружении образца «Варна 2» в нем образуются дислокации и прорастают магистральные трещины, развитие которых обуславливает генерацию ЭМИ с увеличением нагрузки (рис. 1, *c*). Сделанные выводы также подтверждаются и амплитудно-частотными спектрами рисунка 2.

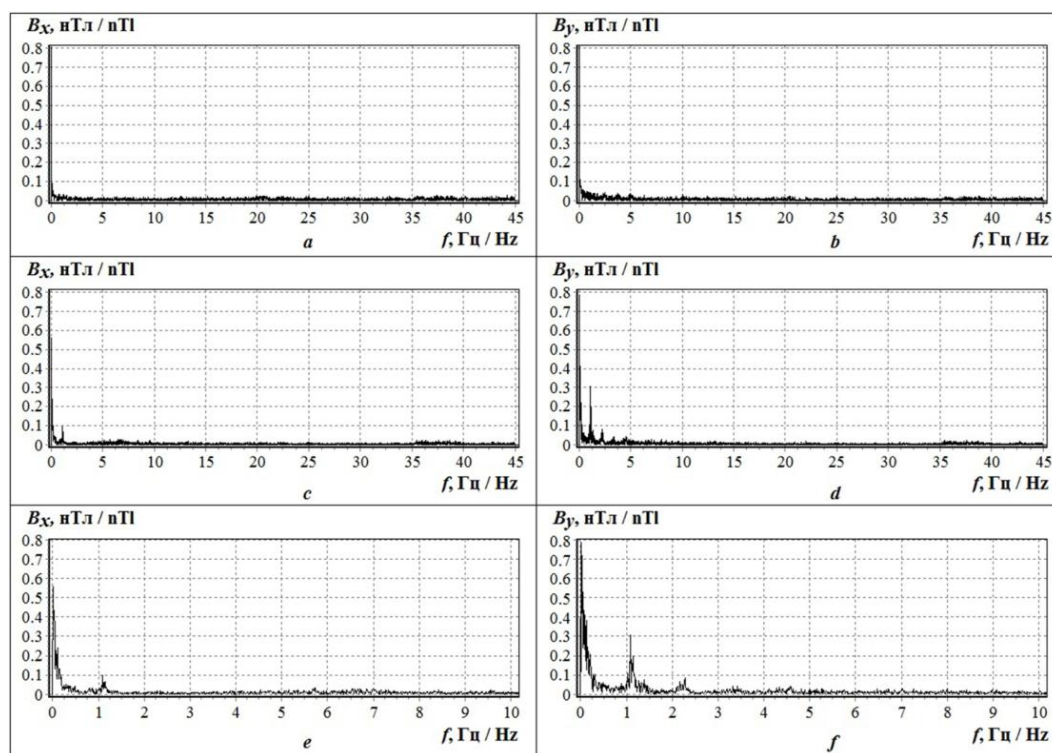


Рис. 2. Амплитудно-частотные спектры магнитной индукции: *a, b* – образца «Варна 1»; *c, d* – образца «Варна 2»; *e, f* – детализированные спектры образца «Варна 2» /

Fig. 2. Amplitude-frequency spectra of magnetic induction: *a, b* – sample “Varna 1”; *c, d* – sample “Varna 2”; *e, f* – detailed spectra of sample “Varna 2”

На спектрограммах компонент магнитной индукции образца «Варна 1» (рис. 2, *a, b*) УНЧ составляющая сигналов ЭМИ не проявилась во всей полосе пропускания,

а их спектры соответствуют розовому шуму. На спектрограммах образца «Варна 2» (рис. 2, *c, d, e, f*) в области частот ниже 5 Гц происходит нарастание низкочастотной составляющей. По компоненте B_x значение амплитуды на частотах 0.01 Гц и 1.1 Гц составило 0.55 нТл и 0.1 нТл; B_y на этих же частотах 0.8 нТл и 0.3 нТл соответственно, а на частоте 2.3 Гц – 0.08 нТл. Проявившиеся на амплитудно-частотных спектрах образца «Варна 2» выраженные пики указанных выше частот непосредственно связаны с генерацией УНЧ ЭМИ при увеличении на образец внешней нагрузки.

Вместе с тем следует заметить, что в процессе разрушения испытуемых образцов вполне можно допустить возникновение высокочастотного ЭМИ, генерируемого на стадии возникновения микротрещин, которое наблюдается в подобных экспериментах [Курленя и др., 2000; Соболев, Пономарев, 2003; Лось и др., 2010; Вострецов и др., 2013; и др.]. Однако используемая в наших экспериментах аппаратура не предназначена для измерения таких сигналов в частотном диапазоне выше 200 Гц.

Поскольку в ряде работ [Курленя и др., 2000; Вострецов и др., 2013; Xiaoyan et al., 2018] показано, что при разрушении образцов разных горных пород проявляется различный характер ЭМИ, то основная причина этого может быть обусловлена различным составом, прочностными свойствами и структурой самих образцов. Чтобы оценить эти факторы был проведен минералогический анализ образцов «Варна 1» и «Варна 2».

По результатам минералогического анализа первый образец «Варна 1» – известняк. Порода сложена преимущественно зернами кальцита (95–99 % площадной доли участков шлифа) размером 0.01–0.5 мм (рис. 3, *a*). Преобладают зерна песчанистой размерности. Структура конформнозернистая, мелко-средне-крупнозернистая. Текстура однородная, прожилковая. Апертура прожилков 0.01–0.03 мм. Прожилки заполнены кальцитом, образованным при вторичных геологических процессах (рис. 3, *a*). Редко встречаются ромбоэдры зерен доломита, занимающие до 2 % площадной доли участков шлифа (рис. 3, *b*).

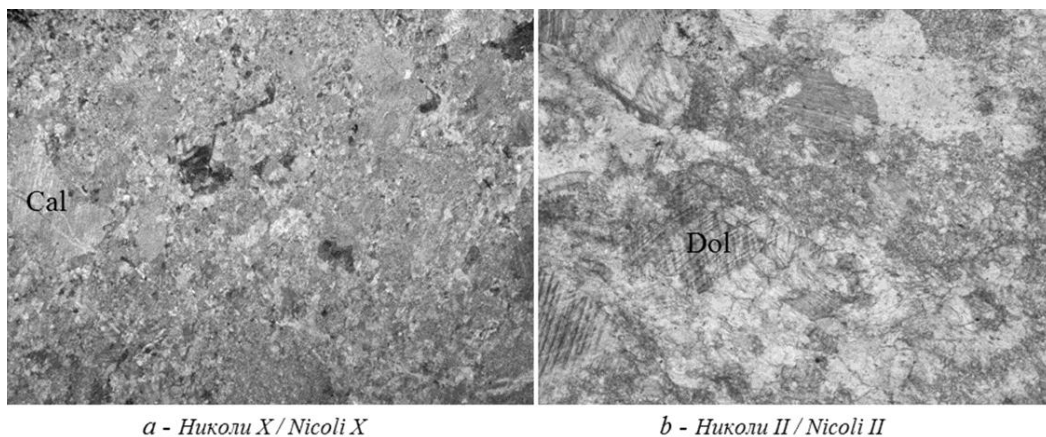
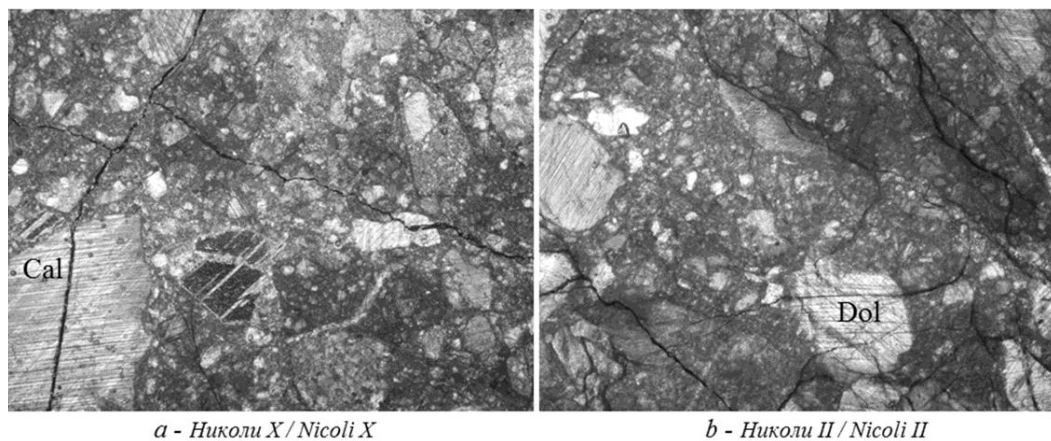


Рис. 3. Шлифы образца «Варна 1» / Fig. 3. Clips of the sample “Varna 1”

Второй образец «Варна 2» – известняк доломитистый, карбонатная брекчия. Порода сложена кальцитом, площадная доля которого на участках шлифа занимает около 90 % (рис. 4, *a*) и в меньшей степени (до 10 % площади участков) доломитом (рис. 4, *b*). Размер зерен от 0.01 до 2 мм. Структура неравномерно зернистая, псаммитовая-грубообломочная. Полуокатанные и угловатые зерна, сцементированные кальцитовым спаритом (>0.01 мм) образуют брекчевидную текстуру. Следует отметить также имеющуюся трещиноватость породы (рис. 4).

*a - Никולי X / Nicoli X**b - Никולי II / Nicoli II**Рис. 4. Шлифы образца «Варна 2» / Fig. 4. Clips of the sample “Varna 2”*

Из минералогического анализа испытуемых образцов следует, что пластическое разрушение образца «Варна 1» может быть обусловлено его слоистой однородной текстурой. Наличие кальцитовых прожилков указывает на первичную трещиноватость, приобретенную и залеченную в ходе воздействия тектоники. Кроме этого, преобладание в нем зерен песчанистой размерности приводит к тому, что каркас образца ослаблен, начинает разрушаться уже при незначительной внешней нагрузке и малой энергии деформации, поэтому УНЧ сигналы ЭМИ не проявляются (рис. 1, *a*). Сделанный вывод также подтверждается графиком нагрузки (рис. 1, *b*).

При анализе образца «Варна 2», обладающего большей плотностью при тех же размерах, наблюдается блочная брекчевидная текстура, имеющая трещиноватости породы. Микроструктура относительно твердая и может выдерживать определенную нагрузку (рис. 1, *d*). Все это соотносится с характерными особенностями хрупкого разрушения образца, которые рассмотрены в работе [Вострецов и др., 2013]. В ней отмечается способность более прочных и хрупких пород «накапливать упругую энергию без интенсивного трещинообразования» перед началом видимого разрушения. Подобные различия в отношении прочностных свойств испытуемых образцов наблюдались также при проведении экспериментальных исследований с применением испытательной машины INSTRON 5967 по одноосному сжатию образцов гранита, отличающихся по минералогическому и химическому составу [Заалишвили и др., 2017].

Поскольку электромеханические дипольные переходные процессы часто происходят на бортах и вершинах трещин [Xiaoyan et al., 2018], то это может быть связано с одним из возможных механизмов генерации ЭМИ. На этапе развития дислокаций и микротрещин с последующим их слиянием происходит интенсивное нарастание системы трещин, что приводит к возникновению УНЧ сигнала ЭМИ в интервале нагрузки 15–35 секунд (рис. 1, *d*).

Не исключено также, что определенную роль может играть дислокационный механизм возникновения медленных поляризационных эффектов под воздействием нагрузки, который приводит к генерации низкочастотного электромагнитного поля, описанный в работе [Hadjicontis, Mavromatou, 1994]. В ней приводятся результаты экспериментов по обнаружению достаточно интенсивных низкочастотных электрических сигналов (порядка 1–2 Гц), возникающих при одноосном сжатии образцов гранита и известняка.

Таким образом, при нагружении образца «Варна 2» его грубообломочная структура и брекчевидная текстура способствуют образованию и развитию системы трещин, а вместе с тем и порождению УНЧ ЭМИ. Полученные результаты показали, что насту-

пление критической стадии разрушения горных пород может сопровождаться ЭМИ не только в высокочастотном, но также и в УНЧ диапазоне.

Выводы

В статье рассмотрены особенности проявления УНЧ сигналов ЭМИ при одноосном нагружении двух различных образцов известняка, а также возможные причины, влияющие на характеристики ЭМИ, такие как прочность, состав и микроструктура образцов.

На основе анализа спектров компонент магнитной индукции установлено, что максимальная амплитуда сигналов проявляется в ультранизкочастотной части спектра (ниже 5 Гц) для более плотного образца известняка, обладающего блочной брекчевидной текстурой. Для другого образца, в котором преобладают зерна песчанистой размерности, характерно его разрушение при незначительной внешней нагрузке, которое не сопровождается УНЧ сигналами ЭМИ.

Применяемая аппаратура на основе ММПМИ позволяет ее использовать для регистрации и выделения на фоне техногенного магнитного шума малоамплитудных сигналов магнитной индукции, возникающих в процессе разрушения образцов горных пород под воздействием внешней нагрузки в виде одноосного сжатия, создаваемого ручным гидравлическим прессом.

Проведенные исследования показывают целесообразность и перспективность экспериментов с использованием ММПМИ при изучении разрушения образцов горных пород по их индикаторам, проявляющимся в УНЧ магнитных сигналах для установления возможных механизмов их генерации при физическом моделировании разрушения образцов горных пород, а также изучения деструктивных процессов в геологической среде, порождающих УНЧ ЭМИ.

Литература

1. Беликов В.Т., Шестаков А.Ф. Изучение временных изменений напряженного состояния геосреды в процессе разрушения. // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49. № 5. – С. 461–470.
2. Вострецов А.Г., Кривецкий А.В., Бизяев А.А., Яковицкая Г.Е. Характеристики электромагнитного излучения горных пород при их разрушении в лабораторных экспериментах. // Доклады АН ВШ РФ. – 2013. – № 2(21). – С. 46–54.
3. Заалишвили В.Б., Бирюлин С.В., Козлова И.А., Мельков Д.А., Юрков А.К. Закономерности проявления аномалий объемной 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.
4. Заалишвили В.Б., Магкоев Т.Т., Туаев Г.Э. Влияние механического воздействия и криогенных условий на физико-химические характеристики горных пород. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – №1. – С. 17–23. DOI: 10.23671/VNC.2017.1.9475.
5. Курленя М.В., Вострецов А.Г., Кулаков Г.И., Яковицкая Г.Е. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2000. – 231 с.
6. Лось В.Ф., Лементуева Р.А., Ирисова Е.Л. Решение аппаратно-методических проблем и изучение электромагнитного излучения в лабораторных экспериментах по разрушению горных пород. // Сейсмические приборы. – 2010. – Т. 46. № 4. – С. 14–24.
7. Матюков В.Е. Практические результаты электромагнитно мониторинга сейсмоактивных зон (обзор). // Вестник КРСУ. – 2011. – Т. 11. № 4. – С. 15–23.
8. Машенко А.В., Пономарев А.Б., Сычкина Е.Н. Специальные разделы механики грунтов и механики скальных пород. Пермь: Изд. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 176 с.
9. Свяжина И.А., Пучков В.Н., Иванов К.С., Петров Г.А. Палеомагнетизм ордовика Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 135 с.
10. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. – 270 с.

11. Сокол-Кутыловский О.Л. Магнитомодуляционные датчики на основе аморфных ферромагнитных сплавов для измерения слабых магнитных полей. // Физические основы приборостроения. – 2022. – Т. 11. № 4(46). – С. 45–48. DOI: 10.25210/jfor-2204-MS.
12. Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. М.: МИФИ, 2000. – 447 с.
13. Шестаков А.Ф., Тягунов Д.С. Методика выделения спектральных характеристик сигналов электромагнитного излучения, регистрируемых при нагружении образцов горных пород на фоне техногенного магнитного шума. // Приборы и методы измерений. – 2025. – Т. 16. № 3. – С. 191–201. DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-191-201.
14. Флоренский П.В., Милосердова Л.В., Балицкий В.П. Основы литологии: учебное пособие. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 105 с.
15. Chengwu L., Shuai F., Cheng G., Tianyu W., Beijing X. Characteristics and generation mechanism of ULF magnetic signals during coal deformation under uniaxial compression. // Journal of Geophysics and Engineering. – 2018. – No. 15. – pp. 1137–1145. DOI: 10.1088/1742-2140/aaac59.
16. Hadjicontis V., Mavromatou C. Transient electric signals prior to rock failure under uniaxial compression. // Geophysical Research Letters. – 1994. – Vol. 21. No 16. – pp. 1687–1690.
17. Park S.K., Johnston M.J.S., Madden T.R., Morgan F.D., Morrison H.F. Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: A review of observations and mechanisms. // Reviews of Geophysics. – 1993. – Vol. 31. No. 2. – pp. 117–132. DOI: 10.1029/93RG00820.
18. Shrivastava A. Are pre-seismic ULF electromagnetic emissions considered as a reliable diagnostics for earthquake prediction? // Current Science. – 2014. – Vol. 107. No 4. – pp. 596–600.
19. Tyagunov D.S., Shestakov A.F. Recording of ultra-low frequency electromagnetic emission during loading of a rock sample. // Measurement Techniques. – 2024. – Vol. 67. – pp. 545–552. DOI: 10.1007/s11018-024-02375-1.
20. Wang E., He X. An experimental study of the electromagnetic emission during the deformation and fracture of coal or rock. // Chinese Journal of Geophysics. – 2000. – Vol. 43. No. 1. – pp. 131–137. DOI: 10.1002/cjg2.17.
21. Xiaoyan S., Xuelong L., Zhonghui L., Zhibo Z., Fuqi C., Peng C., Yongjie L. Study on the characteristics of coal rock electromagnetic radiation (EMR) and the main influencing factors. // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 148. – pp. 216–225. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2017.11.018.

References

1. Belikov V.T., Shestakov A.F. Study of temporary changes in the stress state of the geological environment during the destruction process. *Geology and Geophysics*. 2008. Vol. 49. No. 5. pp. 461–470. (In Russ.)
2. Vostretsov A.G., Krivetsky A.V., Bizyaev A.A., Yakovitskaya G.E. Electromagnetic radiation characteristics of rocks under destruction in laboratory experiments. *Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*. 2013. No. 2(21). pp. 46–54. (In Russ.)
3. Zaalishvili V.B., Biryulin S.V., Kozlova I.A., Melkov D.A., Yurkov A.K. Patterns of Manifestation of Anomalies of Radon Volumetric Activity Before Earthquakes in Various Seismically Active Regions. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 35–50. DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003. (In Russ.)
4. Zaalishvili V.B., Magkoev T.T., Tuaeve G.E. The Influence of Mechanical Impact and Cryogenic Conditions on the Physical and Chemical Characteristics of Rocks. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2017. No. 1. pp. 17–23. DOI: 10.23671/VNC.2017.1.9475. (In Russ.)
5. Kurlenya M.V., Vostretsov A.G., Kulakov G.I., Yakovitskaya G.E. Registration and processing of electromagnetic radiation signals. Novosibirsk. SB RAS Publishing. 2000 p. (In Russ.)
6. Los V.F., Lementueva R.A., Irisova E.L. Solving hardware and methodological problems and studying electromagnetic radiation in laboratory experiments on rock destruction. *Seismic Instruments*. 2010. Vol. 46. No. 4. pp. 14–24. (In Russ.)
7. Matyukov V.E. Practical results of electromagnetic monitoring of seismoactive zones (review). *Bulletin of KRSU*. 2011. Vol. 11. No 4. pp. 15–23 (In Russ.)
8. Mashchenko A.V., Ponomarev A.B., Sychkina E.N. Special sections of soil mechanics and rock mechanics. Perm. Publ. of Perm National Research Polytechnic University. 2014.

176 p. (In Russ.)

9. Svyazina I.A., Puchkov V.N., Ivanov K.S., Petrov G.A. Paleomagnetism of the Ordovician Urals. Yekaterinburg. UB RAS Publishing. 2003. 270 p. (In Russ.)

10. Sobolev G.A., Ponomarev A.V. Physics of Earthquakes and Precursors. Moscow. Nauka. 2003 p. (In Russ.)

11. Sokol-Kutylovsky O.L. Magnetomodulatory sensors based on amorphous ferromagnetic alloys for measuring weak magnetic fields. Physical foundations of instrumentation. 2022. Vol. 11. No 4. pp. 45–48. DOI: 10.25210/jfop-2204-MS. (In Russ.)

12. Surkov V.V. Electromagnetic effects in earthquakes and explosions. Moscow. MIFI. 2000. 447 p. (In Russ.)

13. Shestakov A.F., Tyagunov D.S. A technique for identification of spectral characteristics of electromagnetic radiation signals recorded during loading of rock samples against the background of technogenic magnetic noise. Devices and methods of measurements. 2025. Vol. 16. No. 3. pp. 191–201. DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-191-201. (In Russ.)

14. Florensky P.V., Miloserdova L.V., Balitsky V.P. Fundamentals of lithology: A textbook. Moscow. Publishing house of Gubkin RSU of Oil and gas. 2003. 105 p. (In Russ.)

15. Chengwu L., Shuai F., Cheng G., Tianyu W., Beijing X. Characteristics and generation mechanism of ULF magnetic signals during coal deformation under uniaxial compression. Journal of Geophysics and Engineering. 2018. No. 15: pp. 1137–1145. DOI: 10.1088/1742-2140/aaac59.

16. Hadjicontis V., Mavromatou C. Transient electric signals prior to rock failure under uniaxial compression. Geophysical Research Letters. 1994. Vol. 21. No 16. pp. 1687–1690.

17. Park S.K., Johnston M.J.S., Madden T.R., Morgan F.D., Morrison H.F. Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: A review of observations and mechanisms. Reviews of Geophysics. 1993. Vol. 31. No. 2. pp. 117–132. DOI: 10.1029/93RG00820.

18. Shrivastava A. Are pre-seismic ULF electromagnetic emissions considered as a reliable diagnostics for earthquake prediction? Current Science. 2014. Vol. 107. No 4. pp. 596–600.

19. Tyagunov D.S., Shestakov A.F. Recording of ultra-low frequency electromagnetic emission during loading of a rock sample. Measurement Techniques. 2024. Vol. 67. pp. 545–552. DOI: 10.1007/s11018-024-02375-1.

20. Wang E., He X. An experimental study of the electromagnetic emission during the deformation and fracture of coal or rock. Chinese Journal of Geophysics. 2000. Vol. 43. No. 1. pp. 131–137. DOI: 10.1002/cjg2.17.

21. Xiaoyan S., Xuelong L., Zhonghui L., Zhibo Z., Fuqi C., Peng C., Yongjie L. Study on the characteristics of coal rock electromagnetic radiation (EMR) and the main influencing factors. Journal of Applied Geophysics. 2018. Vol. 148. pp. 216–225. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2017.11.018.

DOI: 10.46698/VNC.2026.14.82.001

Original paper

The role of hydrology in hillslope monitoring and landslide risk mitigation

S.N. Chellamuthu¹, V.B. Zaalishvili², G.P. Ganapathy¹

¹ Centre for Disaster Mitigation and Management, Vellore Institute of Technology (VIT), Vellore, 632 014, Tamil Nadu, India, e-mail: seismogans@yahoo.com;

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

Received: 05.11.2025, revised: 23.02.2026, accepted: 27.02.2026

Abstract: Relevance. Landslides constitute a major geo-hydrological hazard, and rainfall-induced subsurface processes play a critical role in slope destabilization. **The aim** of the work is to determine the condition when studying various types of landslides. Despite substantial advances in landslide research, the integration of hillslope hydrology with monitoring frameworks and early warning systems remains fragmented. This review synthesizes recent developments in landslide research, with an emphasis on hydrological triggering mechanisms and their incorporation into landslide early warning systems (LEWS). **Methods.** A structured literature review of peer-reviewed studies published between 2012 and 2022 was conducted using the Scopus database, complemented by thematic classification of experimental, numerical, and field-based investigations. **Results.** The analysis identified rainfall infiltration, pore-water pressure evolution, matric suction reduction, and groundwater fluctuations as dominant hydrological controls governing slope response. While numerous studies have focused on shallow failures under unsaturated conditions, comparatively little attention has been paid to deep-seated processes and bedrock groundwater interactions. The review further examines sensor-based and model-driven LEWS architectures, highlighting the predominance of rainfall threshold approaches and the emerging role of hydro-mechanical and machine learning frameworks. The findings underscore the necessity of integrating subsurface hydrological monitoring with geotechnical characterization to enhance the predictive reliability and operational robustness of LEWS in landslide prone regions.

Keywords: landslides, slope processes, hillslope monitoring, early warning system, rainfall-induced landslides.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the Vellore Institute of Technology for facilitating this research.

For citation: Chellamuthu S.N., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P. The role of hydrology in hillslope monitoring and landslide risk mitigation. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 80-92. DOI: 10.46698/VNC.2026.14.82.001

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2026.14.82.001

Оригинальная статья

Роль гидрологии в мониторинге склонов и снижении риска оползней

С.Н. Челламуту¹, В.Б. Заалишвили², П.Г. Ганапати¹

¹ Центр по смягчению последствий и управлению стихийными бедствиями,
Технологический институт Веллора (VIT), Индия, 632 014, Веллор, Тамил Наду,
e-mail: seismogans@yahoo.com;

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

Статья поступила: 05.11.2025, доработана: 23.02.2026, принята к публикации: 27.02.2026

Резюме: Актуальность работы. Оползни представляют собой серьезную геогидрологическую опасность, а подземные процессы, вызванные осадками, играют решающую роль в дестабилизации склонов. **Цель работы** – выявить состояние при изучении различных особенностей оползней. Несмотря на значительные успехи в исследовании оползней, интеграция гидрологии склонов с системами мониторинга и раннего предупреждения остается фрагментарной. В обзоре обобщены последние достижения в области исследования оползней с акцентом на гидрологические механизмы их возникновения и их включение в системы раннего предупреждения об оползнях (LEWS). **Методы.** Был проведен структурированный обзор рецензируемых исследований, опубликованных в период с 2012 по 2022 годы, с использованием базы данных Scopus, дополненной тематической классификацией экспериментальных, численных и полевых исследований. **Результаты.** Анализ выявил, что инфильтрация осадков, изменение давления поровой воды, снижение матричного всасывания и колебания уровня грунтовых вод являются доминирующими гидрологическими факторами, определяющими реакцию склонов. При этом многочисленные исследования сосредоточены на неглубоких оползнях в ненасыщенных условиях, и сравнительно мало внимания уделялось глубоким процессам и взаимодействию грунтовых вод с коренными породами. Далее рассматриваются архитектуры LEWS, основанные на датчиках и моделях, с акцентом на преобладание подходов, основанных на пороговых значениях осадков, и растущую роль гидромеханических и машинных моделей обучения. Установлена необходимость интеграции подземного гидрологического мониторинга с геотехнической характеристикой для повышения надежности прогнозирования и эксплуатационной устойчивости LEWS в регионах, подверженных оползням.

Ключевые слова: оползни, склоновые процессы, мониторинг склонов, система раннего предупреждения, оползни, вызванные осадками.

Благодарности: Авторы выражают благодарность Технологическому институту Веллоре за содействие в проведении данного исследования.

Для цитирования: Челламуту С.Н., Заалишвили В.Б., Ганапати П.Г. Роль гидрологии в мониторинге склонов и снижении риска оползней. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 80-92. DOI: 10.46698/VNC.2026.14.82.001

Introduction

A landslide is the movement of a mass of rock, earth, or debris down a slope [Cruden, 1991], which is recognized globally as a major geological hazard causing fatalities and casualties [Ganapathy et al., 2010]. It is caused by various complex and diverse factors and is categorized based on the material type and movement [Hungr et

al., 2014]. Factors such as rainfall, soil type, erosion, and anthropogenic influence are recognized as landslide-triggering factors [Kervyn et al., 2015; Burdzieva et al., 2024 a, b]. Increasing tourism and the urbanization of hillside towns have increased construction and road widening in mountainous regions [Ganapathy, Hada, 2012; Klyuev, Brigida, 2025], and climate change [Andersson-Skold et al., 2013; Araujo et al., 2022; Crozier, 2010; Gassner et al., 2015; Korup et al., 2012; Wood et al., 2020; Yaitskaya et al., 2023] has directly influenced landslides, causing difficulties for people, infrastructure, and the economy, indicating that the region is associated with geo-hydrological risks [Gariano, Guzzetti, 2016]. Processes, such as slope erosion, which carves out geomorphological features forming landscapes over millions of years, create valleys and elevated hills that are inactive over the bedrock and when the external factors acting on the slopes make it vulnerable to landslides. Various researchers have studied these slopes using different approaches to identify landslide-prone slopes for developing landslide early warning systems (LEWS) for preparedness and mitigation.

External disturbances can cause disasters with high damage, and it depends on the understanding of complex subsurface processes, especially concerning landslides and hillslope hydrology [Prokesova et al., 2013]. The dynamics of rainfall infiltration, subsurface movement systems, and functioning conditions are complex and site-specific. Soil saturation, matric suction, and pore water pressure greatly influence slope stability during the infiltration process. Variations develop with the essential volume parameters of the soil by normal stress and matric suction. According to Lu and Godt [2008], few slope failures have been reported within the vadose zone that are associated with partially saturated soil conditions. This indicates that certain shallow landslides cannot be attributed to saturated conditions. Owing to the complicated lithological and hydrologic properties of unstable regions, which most of the time lead to nonlinear links between rainfall and failure [Doglioni et al., 2012]. The slope responds to rainfall distribution in the downslope portion, where the rotational slide dynamic influences the Earth's flow [Belle et al., 2018]. If there is a prolonged duration of rainfall with less intensity, it can enhance landslide stability; thus, a rainy season after a long wet period may cause more movement or failure than one after a long dry period. Even slight variations in precipitation or water stress can shift the soil's equilibrium stress condition and significantly alter the duration and magnitude of slope movement. In addition, medium- to large-scale landslides are caused by increased moisture levels and subsequent heavy rainfall [Suribabu, Sujatha, 2019]. Various researchers have proposed preliminary alert mechanisms based on sensors [Bak, 2022; Chauhan et al., 2022; Dixon et al., 2022; Guzzetti et al., 2020; Kumar, Ramesh, 2022; Liu et al., 2022; Oguz et al., 2022; Zeng et al., 2022], mostly installed on the slope surface. Based on [Baum, Godt, 2010; Bell et al., 2012; Mirus et al., 2018; Thiebes et al., 2014], the system evaluates rainfall and slope movement, and the landslide management increasingly depending on such LEWS [Landslide ..., 2005].

Evidence from these studies shows that the dynamic interplay between landslide mechanisms, hydrological dynamics, and early warning systems has yet to be fully examined. Although progress has been made in this field, greater insight into the effects of subsurface water variations on landslide initiation and progress is needed. The present study investigates the current state of global landslide research, focusing on the critical role of hillslope hydrology in landslide initiation and the effectiveness of early warning systems. The study addresses three key research questions: What are the recent trends and developments in landslide research? How do hydrological factors contribute to landslide triggering? and What is the current state and effectiveness of LEWS?

Materials and methods

Review protocol

A comprehensive literature review was conducted using the Scopus database from 2012 to 2022. This review was then expanded to include additional relevant studies identified through other research sources, ensuring a thorough and comprehensive analysis. The primary research focus and associated keywords were chosen based on an analysis of publication dates and existing studies within the relevant research area. Search terms related to landslides, hydrology, subsurface processes, early warning systems, and groundwater, along with alternative terms, were also used. The search data were exported for analysis in Biblioshiny [Aria, Cuccurullo, 2017], an R package. The articles were accessed and screened for the study based on their title, abstract, and full text.

Results

Bibliometric overview

The following analysis addresses RQ1, providing insights into the trends and patterns within global landslide research (Fig. 1). The general trend of scientific production was retrieved from the Scopus database during 2012–2022, indicating increasing interest in landslide research. The results show a nonlinear observation, indicating that publications are inconsistent over the period. The cumulative occurrence from journal sources highlights the growing trend in landslide research. The journal *Landslides* exhibits a steady increase, whereas other journals show a steady and moderate increase over production over the period, indicating the growing need for scientific publications on landslide research.

The relative scientific production (Fig. 2) from different countries worldwide depicts that China is the leading country in terms of scientific production. Many countries in Europe and North America have shown substantial production. Some countries in Asia, such as India, Japan, and South Korea, have indicated that they are emerging as significant scientific production shows the research and development in recent years. Figure 3 demonstrates the global scientific network with collaborations spanning across the continents. It shows that China has extensive thick lines connecting it to other countries, indicating active collaboration and partnerships. The dense network is highlighted among European countries. In Asia, countries such as India, Japan, and South Korea have depicted increasing collaboration.

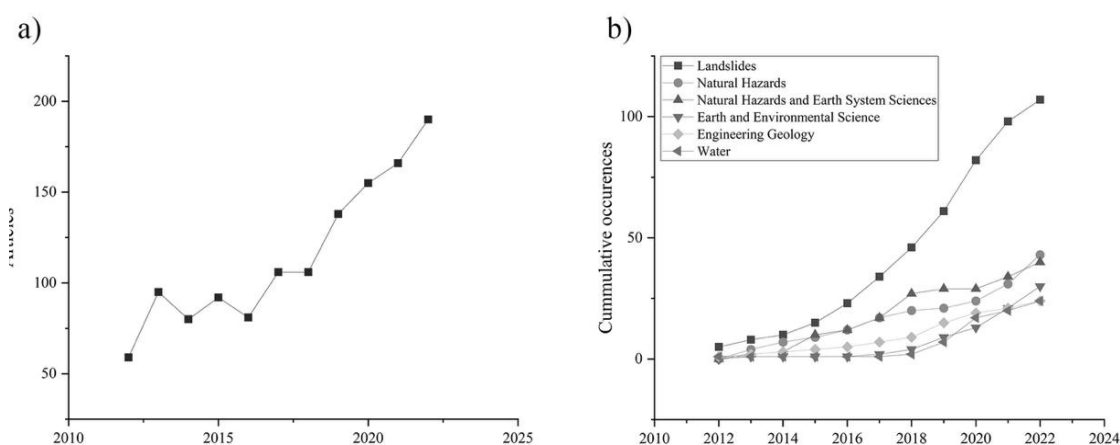


Fig. 1. (a) Annual number of publications on landslide research from 2012 to 2022.
(b) Cumulative number of publications in selected journals over the same period

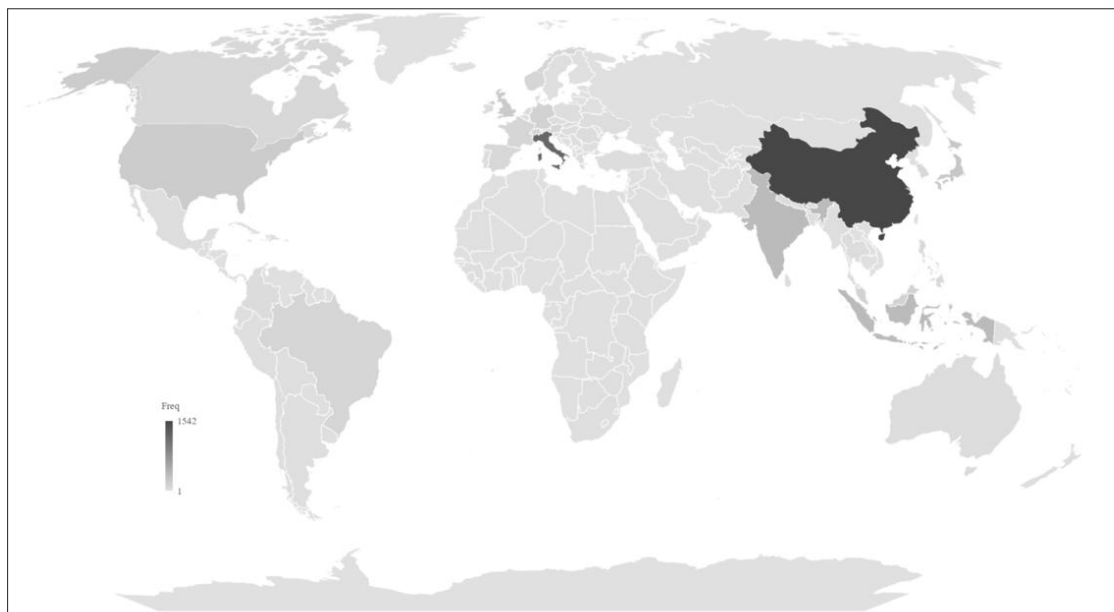


Fig. 2. The country level scientific production



Fig. 3. The country level collaboration map

Hydrological Factors and Landslide Triggering

The following analysis addresses RQ2 in Table 1. The articles connect interdisciplinary fields with landslide hydrology to understand hillslope dynamics. The review denotes that studies majorly overlook experimental physical and numerical models for understanding hydrological behavior on hillslopes. Parameters such as geotechnical properties (deformation characteristics, factor of safety, and index properties (angle of internal friction, cohesion, liquid limit, plastic limit, and relative density, matrix suction, porewater pressure, soil types and soil water interaction), hydraulic conductivity (water flux), rainfall intensity (artificial rain, seepages, and irrigations), slope inclination, slope saturation, and soil motions have been studied. Table 1 shows that experimental setups are widely used, and modelling is applied to the analysis. Studies majorly concern the slope response to water flux during wet and dry periods, as well as their characteristics behavior when the water moves towards the subsurface. Some case studies denote the deformation of slopes through field observations with or through large-scale models and laboratory tests. The stability of slopes is tested by

inputting physical, chemical, and hydromechanical properties to understand the slope's dynamic to water flux in the determination of thresholds, formulation of different slopes, and its response. These findings indicate that fluctuations in subsurface water conditions are a primary trigger of slope failures and therefore, justifying the systematic integration of hydrological monitoring within landslide early warning systems (LEWS).

Table 1

Hydrological Controls and Modeling Approaches in Rainfall-Induced Landslides

Hydrological Process	Modeling Type	Key Parameters	References	Technical Insight	Research Gap
Rainfall infiltration in unsaturated soils	FEM-based seepage deformation modeling; soil water balance models	Rainfall intensity duration; hydraulic conductivity; matric suction; pore-water pressure	Dou et al. [2021]; Yang et al. [2021]	A transient reduction in the matrix suction and a progressive increase in the pore pressure govern shallow instability.	Limited probabilistic treatment and shallow-slope dominance.
Hydro-mechanical coupling	Coupled hydro-mechanical FEM; suction stress frameworks	Effective stress; SWCC; shear strength parameters	Oh, Lu [2015]	Improved prediction of deformation timing compared with limit-equilibrium methods	High parameter sensitivity; limited large-scale validation
Groundwater fluctuation and multilayer interaction	Integrated hydrogeological modeling; field monitoring	Groundwater oscillation; permeability contrasts; perched aquifers	Kukemilks et al. [2018]; Marc et al. [2017]; Wang et al. [2020]	Subsurface flow concentration significantly alters the stability response.	Fractured bedrock flow is rarely modeled explicitly.
Preferential flow and structural discontinuities	Field and numerical case investigations	Desiccation cracks; rapid infiltration pathways	Zhang et al. [2021]	Structural discontinuities accelerate the localized pore-pressure buildup.	Long-term evolution of preferential pathways not sufficiently quantified
Rainfall pattern variability and threshold behavior	Experimental hydrological modeling	Rainfall temporal distribution; intensity–duration thresholds	Ran et al. [2019]; Kenanoglu et al. [2019]	Temporal rainfall distribution affects pore-pressure dynamics beyond cumulative totals.	Rare integration into operational warning thresholds
Deep-seated landslide hydrology	Field investigations; seasonal groundwater analysis	Delayed pore-pressure diffusion; clay–water interaction	Prokesova et al. [2013]; Sidle et al. [2019]; Bogaard, Greco [2016]	Seasonal recharge influences deep-seated slope reactivation	Limited hydro-mechanical coupling at depth

The landslide early warning systems (LEWS)

This analysis addresses RQ3 in Table 2. A review of landslide early warning systems (LEWS) highlights different approaches for landslide monitoring using sensors

(accelerometer, acoustic sensor, automated total station, crack meter, displacement sensor, echo probe, extensometer, gyroscope, inclinometer, infrasound sensor, moisture sensor, piezo vibration sensor, piezometer, potentiometer, rain gauge, strain gauge, suction sensor, tachymetry, tensiometer, tilt sensor, transducer, volumetric water content sensor, and water level indicator), ground-based radars, and remote sensing. These monitoring systems employ automated data acquisition and transmission through Internet of Things (IoT) platforms and wireless sensor networks (WSNs). The literature distribution shows that China has more studies on LEWS, emphasizing field monitoring using sensors and modeling. European countries use geotechnical monitoring with remote sensing. Countries such as India, the Philippines, and Indonesia have highlighted the design, development, and prototypes of landslide monitoring. These highlight the low cost and easy deployment of sensors and monitoring systems. These studies recommend the robustness of using artificial intelligence and machine learning techniques for automatic detection and warnings for risk reduction.

Table 2

Architectural and Methodological Approaches in Landslide Early Warning Systems (LEWS)

LEWS Architecture Type	Monitoring Basis	Parameters	References	Technical Insight	Limitation
Empirical rainfall-threshold systems	Regional rainfall monitoring	Rainfall intensity; duration; antecedent rainfall	Guzzetti et al. [2020]; Harilal et al. [2019]	Operationally scalable and straightforward to implement.	Limited subsurface representation and false-alarm sensitivity.
Subsurface hydrological monitoring	Instrumented slopes with pore-pressure sensors	Pore-water pressure; soil moisture; groundwater level	Mirus et al. [2018]	Direct Linkage Between Hydrological Response and Deformation	Higher installation and maintenance costs
Hydro-mechanical threshold integration	Stability modeling integrated with monitoring	Factor of safety; suction; deformation rate	Bell et al. [2012]	Mechanistically informed thresholds incorporating stability analysis	Model parameter uncertainty influences reliability.
Remote sensing based monitoring	Radar interferometry and displacement mapping	Surface displacement rate	Crosta et al. [2017]	High spatial coverage for complex slopes	Surface-focused; limited subsurface insight
Acoustic emission monitoring	Micro-fracturing signal detection	Acoustic emission rate; deformation precursors	Dixon et al. [2018]	Sensitive to progressive failure signals	Challenges in signal filtering and interpretation complexity
Data-driven predictive systems	Machine learning models	Multivariate hydrological and environmental inputs	Liu et al. [2022]	Captures nonlinear relationships in regional-scale prediction	Requires large training datasets and has limited interpretability

The reviewed studies indicate that effective landslide risk reduction requires a coordinated framework encompassing risk assessment, continuous monitoring, and structured

emergency response mechanisms. The modified framework (Fig. 4) for the LEWS suggests that landslide investigation starts with an understanding of the local climate, geological, and hydrological processes, followed by the identification of landslide-prone slopes and the installation of sensors. Automatic acquisition, detection, and classification with sensor values to threshold values using artificial intelligence and machine learning help to forecast landslide movements and aid in emergency responses. modelling and experimental studies have shown that rainfall and its associated processes can induce failures. More studies have discussed the role of large and physical models on slope behavior by assuming that the bedrock is homogeneous, which neglects the role of the bedrock in landslide hydrology. The simulations are narrow towards the landslide prediction approach, showing a greater need to include multidisciplinary inputs for the models. Thus, the literature review suggests that holistic approaches for the LEWS, by understanding the response of the slope to rainfall and its subsurface processes in triggering landslides, should be delineated.

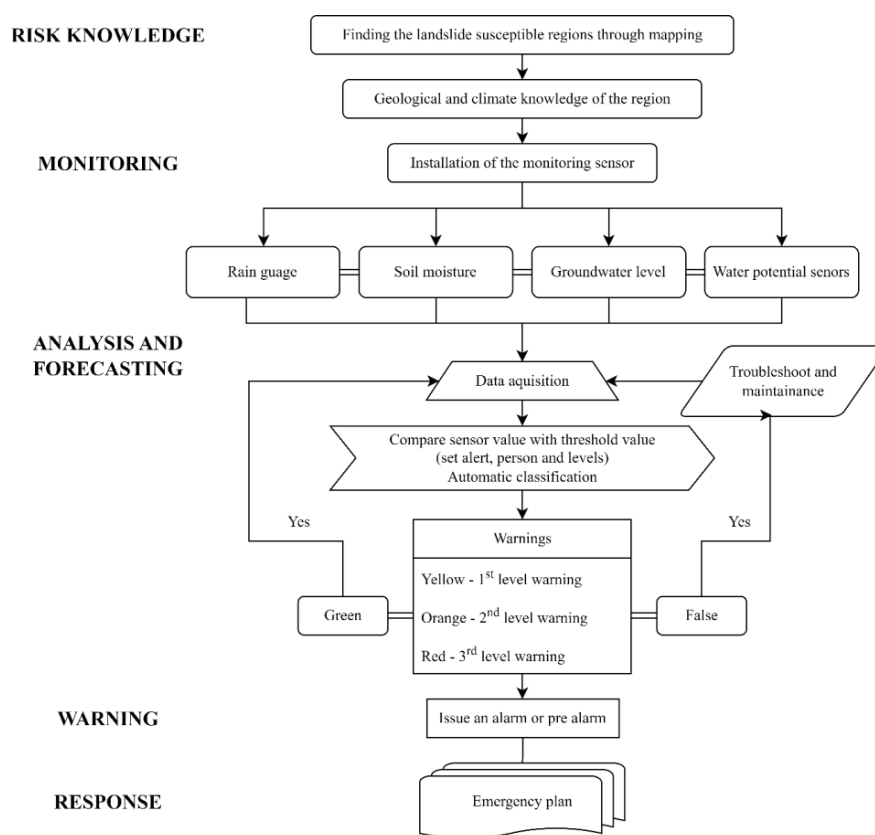


Fig. 4. Schematic representation of the landslide early warning system and its constituent components

Discussion

A comprehensive understanding of landslide mechanisms modeling mental to the effective prevention and mitigation of landslide hazards and their associated impacts on communities, infrastructure, and the environment [Nath et al., 2025]. Although landslide research has been conducted extensively, the specific focus and methodologies vary widely, reflecting the evolving nature of the field. The growing recognition of the link between climate change and landslide susceptibility has driven a surge in research activity, as evidenced by the increasing number of publications. A multidisciplinary approach is crucial for comprehensively understanding landslides and developing effective management strategies. There has been a notable increase in scientific research on landslides in developing

nations, likely driven by the growing frequency and severity of landslide-related disasters. Countries such as China, the United States, and Italy have developed distinct strategies for landslide mitigation, often supported by advanced monitoring and analytical technologies. Strengthened collaboration among researchers across regions can enhance methodological refinement and support the transfer of technical expertise.

Rainfall is a primary triggering factor of landslides [Gupta, Leong, 2019]; although rainfall and hydrology are different fields of study, there is sufficient interdisciplinary overlap, making it impossible to deny their mutual importance [Climate ..., 2005]. Complex interactions among rainfall, the physical heterogeneity of soil and bedrock, local geomorphology, vegetation, and associated biomass contribute to the complexity of subsurface hydrological processes [Sidle et al., 2019]. The specific parameters selected often depend on the research objectives and the geological and geomorphological characteristics of the study area. A variety of parameters have been considered in landslide research, with rainfall consistently identified as an inducing factor. Other factors include erosional conditions, geotechnical properties, groundwater interactions, hydraulic conductivity, hydromechanical conditions, slope saturation states, and topographical conditions. Rainfall infiltration plays an important role in slope stability. The rate of this process is influenced by the interaction between various geological formations. Thus, the formation of perched aquifers [Rahardjo et al., 2005], macropores, and cracks can enhance infiltration rates, further destabilizing slopes due to erosional activity [Idarmachev, 2025]. The combined effects of rainfall infiltration and erosional activity can trigger shallow landslides. Erosion can lead to the loss of topsoil; thus, materials can clog drainage channels and block the flow of water, making it stagnant; therefore, increasing the risk of landslides.

Geotechnical factors, such as saturation and rainfall response, on slopes are necessary to understand hydrological behavior and its impact on slope stability [Priest et al., 2011; Sun et al., 2012]. Most studies have modeling hillslope deposit covers; however, some studies have indicated the importance of groundwater and bedrock features on hillsides, such as their responses and processes in the ground. Experimental studies often rely on assumptions, such as homogeneous topsoil formation and impermeable bedrock, leading to inconsistencies between field and experimental results [Bogaard, Greco, 2016]. Variations in geological formation on hillslopes can increase infiltration, thus creating channels and groundwater interactions [Collins, Znidarcic, 2004]. Because hydrological processes are time-dependent, physical and numerical modeling approaches are widely used to analyze and simulate landslide behavior under controlled conditions [Klyuev, Brigida, 2025; Kerimov, Elzhaev, 2024]. These models can include additional factors to comprehensively understand regional characteristics, which enhances the effectiveness of LEWS.

A comprehensive understanding of hillslope hydrology is essential for the development of effective landslide early warning systems (LEWS). Adapting LEWS to site-specific needs requires a thorough understanding of local hydrological conditions. While LEWS distribution varies globally, developing countries such as India, the Philippines, and Indonesia have focused significantly on LEWS prototyping. However, many prototypes overlook the importance of subsurface monitoring and data transfer in favor of networking. Existing LEWS primarily rely on geotechnical monitoring, rainfall thresholds, slope monitoring, and surface displacement, using various sensors to measure parameters such as acoustic emission, moisture content, pore water distribution, rainfall, slope inclination, stress, and strain, and volumetric water content. The thresholds for these sensors are typically set based on historical landslide data. Although rainfall thresholds are often used, it is crucial to recognize that rainfall is not the sole trigger for landslides. Established slope monitoring utilizes geotechnical properties and slope movements by integrating water potential sensors to measure water content at various depths within hillslopes, which can

improve the efficiency of LEWS. Owing to its cost, deployment, and maintenance, it is highly expensive; therefore, it is essential to develop and deploy reliable and low-cost alternatives. Hence, we can enhance our ability to monitor slope stability and mitigate landslide risks.

Challenges, Limitations, and Future Research

The study of landslide research trends, hillslope hydrology, and its applicability to LEWS has provided valuable insights. However, important research gaps, problems, and what remains to be explored are apparent. The challenges highlighted the lack of ability of landslide experiments to replicate natural conditions, lack of understanding of deep-seated landslides with hillslope hydrology, and determining LEWS's performance remains a major challenge.

In developing countries, LEWS prioritize the use of water potential sensors and precede regional evaluations. Addressing these challenges and limitations will enable future research to advance toward a more integrated understanding of landslide processes and to develop more reliable and effective LEWS. Although it is expensive in its design and can be very expensive in LEWS, it is important to design low-cost sensors and deployment strategies. The importance in this regard lies in the prioritization of hydrological monitoring and the implementation of LEWS designs in landslide-prone regions. Despite previous research, many research gaps persist, allowing for possible innovative approaches. Future studies might better be centered on the simulation of a multilayered slope, added with groundwater fluctuations and other parameters, to improve the understanding of landslide triggering mechanisms.

Conclusion

Highlights the importance of hillslope hydrology in understanding landslide mechanisms. Identifies rainfall infiltration and subsurface interactions as key factors triggering shallow landslides. Proposes low-cost, sensor-based LEWS tailored to regional hydrological and geotechnical conditions. This highlights critical research gaps in modeling deep-seated landslides and subsurface monitoring.

This comprehensive review and bibliometric analysis evaluate the current state of knowledge regarding hydrological processes that trigger landslides and the development of early warning systems. By summarizing the data of various studies and analyzing the trends, collaborations, and frequently presented themes in publications, it contributes to understanding the research field by pointing out knowledge gaps and limitations in methodological approaches. These results can be useful in guiding future research initiatives, such as the development of low-cost early warning systems and the importance of hydrologic monitoring in landslide mitigation. Certainly, significant progress has been made in understanding landslide triggers and establishing early warning systems. However, much more needs to be learned about the complexities involved in hydrologic interactions for effective LEWS.

References

1. Andersson-Skold Y., Bergman R., Johansson M., Persson E., Nyberg L. Landslide risk management – A brief overview and example from Sweden of current situation and climate change. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2013. Vol. 3. No. 1. pp. 44–61. DOI: 10.1016/j.ijdr.2012.11.002.
2. Araujo J.R., Ramos A.M., Soares P.M.M., Melo R., Oliveira S.C., Trigo R.M. Impact of extreme rainfall events on landslide activity in Portugal under climate change scenarios. *Landslides*. 2022. Vol. 19. No. 10. pp. 2279–2293. DOI: 10.1007/s10346-022-01895-7.

3. Aria M., Cuccurullo C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*. 2017. Vol. 11. No. 4. pp. 959–975. DOI: 10.1016/j.joi.2017.08.007.
4. Bak M. The use of automatic measurement techniques in the geotechnical monitoring system of PGE GiEK S.A., KWB Turow branch. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2022. Vol. 9. No. 1. DOI: 10.1007/s40789-022-00555-4.
5. Baum R.L., Godt J.W. Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA. *Landslides*. 2010. Vol. 7. No. 3. pp. 259–272. DOI: 10.1007/s10346-009-0177-0.
6. Bell R., Glade T., Thiebes B., Glade T., Bell R. Landslide analysis and integrative early warning – local and regional case studies. *Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding – Eberhardt et al. (Eds)*. 2012. pp. 2011–2013. DOI: 10.13140/RG.2.1.1229.7844.
7. Belle P., Aunay B., Lachassagne P., Ladouche B., Join J.L. Control of tropical landcover and soil properties on landslides' aquifer recharge, piezometry and dynamics. *Water (Switzerland)*. 2018. Vol. 10. No. 10. pp. 12–14. DOI: 10.3390/w10101491.
8. Bogaard T.A., Greco R. Landslide hydrology: from hydrology to pore pressure. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. 2016. Vol. 3. Issue 3. pp. 439–459. DOI: 10.1002/wat2.1126.
9. Burdzieva O.G., Melkov D.A., Revazov M.O., Kortiev A.L. Activation of landslide processes caused by urbanization of mountainous areas. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024a. Vol. 16. No. 4. pp. 1646–1658. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1646-1658. (In Russ.)
10. Burdzieva O.G., Revazov M.O., Kortiev A.L., Gogichev R.R. Influence of geodynamic processes on the geocological load of mountain region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024b. Vol. 14. No. 4. pp. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014. (In Russ.)
11. Chauhan P., Sain K., Mehta M., Singh S.K. An investigation of cloudburst-triggered landslides and flash floods in Arakot Region of Uttarkashi District, Uttarakhand. *Journal of the Geological Society of India*. 2022. Vol. 98. No. 12. pp. 1685–1690. DOI: 10.1007/s12594-022-2238-0.
12. Climate and hydrology in mountain areas. Eds. De Jong C., Collins D., Ranzi R. John Wiley and Sons, Ltd. 2005. 350 p.
13. Collins B.D., Znidarcic D. Stability analyses of rainfall induced landslides. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2004. Vol. 130. No. 4. pp. 362–372. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(2004)130:4(362).
14. Crosta G.B., Agliardi F., Rivolta C., Alberti S., Dei Cas L. Long-term evolution and early warning strategies for complex rockslides by real-time monitoring. *Landslides*. 2017. Vol. 14. No. 5. pp. 1615–1632. DOI: 10.1007/s10346-017-0817-8.
15. Crozier M.J. Deciphering the effect of climate change on landslide activity: A review. *Geomorphology*. 2010. Vol. 124. Issues 3–4. pp. 260–267. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.04.009.
16. Cruden D.M. A simple definition of landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. 1991. Vol. 43. Issue 1. DOI: 10.1007/BF02590167.
17. Dixon N., Smith A., Flint J.A., Khanna R., Clark B., Andjelkovic M. An acoustic emission landslide early warning system for communities in low-income and middle-income countries. *Landslides*. 2018. Vol. 15. No. 8. pp. 1631–1644. DOI: 10.1007/s10346-018-0977-1.
18. Dixon N., Smith A., Pietz M. A community-operated landslide early warning approach: Myanmar case study. *Geoenvironmental Disasters*. 2022. Vol. 9. No. 1. DOI: 10.1186/s40677-022-00220-7.
19. Doglioni A., Fiorillo F., Guadagno F.M., Simeone V. Evolutionary polynomial regression to alert rainfall-triggered landslide reactivation. *Landslides*. 2012. Vol. 9. No. 1. pp. 53–62. DOI: 10.1007/s10346-011-0274-8.
20. Dou Z., Liu Y., Zhang X., Wang Y., Chen Z., Wang J., Zhou Z. Influence of layer transition zone on rainfall-induced instability of multilayered slope. *Lithosphere*. 2021. Special Issue 4. DOI: 10.2113/2021/2277284.
21. Ganapathy G.P., Hada C.L. Landslide hazard mitigation in the Nilgiris District, India – environmental and societal issues. *International Journal of Environmental Science and Development*. 2012. pp. 497–500. DOI: 10.7763/ijesd.2012.v3.274.
22. Ganapathy P.G., Kandhasamy M., Sekar S.K. Need and urgency of landslide risk planning for Nilgiri District, Tamil Nadu State, India. *International Journal of Geomatics and Geosciences*. 2010. Vol. 1. pp. 29–40.
23. Gariano S.L., Guzzetti F. Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*. 2016.

Vol. 162. pp. 227–252. DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.08.011.

24. Gassner C., Promper C., Begueria S., Glade T. Climate change impact for spatial landslide susceptibility. In: Engineering Geology for Society and Territory. Vol. 1: Climate Change and Engineering Geology. 2015. pp. 429–433. DOI: 10.1007/978-3-319-09300-0_82.

25. Gupta S., Leong E.C. A study of critical rainfall and landslide occurrence. In: 7th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils. AP-UNSAT 2019. 2019. pp. 234–238. DOI: 10.3208/jgssp.v07.036.

26. Guzzetti F., Gariano S.L., Peruccacci S., Brunetti M.T., Marchesini I., Rossi M., Melillo M. Geographical landslide early warning systems. Earth-Science Reviews. 2020. Vol. 200. 102973. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102973.

27. Harilal G.T., Madhu D., Ramesh M.V., Pullarkatt D. Towards establishing rainfall thresholds for a real-time landslide early warning system in Sikkim, India. Landslides. 2019. Vol. 16. No. 12. pp. 2395–2408. DOI: 10.1007/s10346-019-01244-1.

28. Hungr O., Leroueil S., Picarelli L. The Varnes classification of landslide types, an update. In: Landslides. Springer Verlag. 2014. Vol. 11. Issue 2. pp. 167–194. DOI: 10.1007/s10346-013-0436-y.

29. Idarmachev Sh.G. The system of continuous monitoring of parameters of cracks in a mountain range on the basis of resistive sensors. Geology and Geophysics of Russian South. 2025. Vol. 15. No. 1. pp. 82–91. DOI: 10.46698/VNC.2025.78.66.007. (In Russ.)

30. Kenanoglu M.B., Ahmadi-Adli M., Tokar N.K., Huvaj N. Effect of unsaturated soil properties on the intensity-duration threshold for rainfall triggered landslides. Teknik Dergi/Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers. 2019. Vol. 30. No. 2. pp. 9009–9027. DOI: 10.18400/tekderg.414884.

31. Kervyn M., Jacobs L., Maes J., Che V.B., De Hontheim A., Dewitte O., Isabirye M., Sekajugo J., Kabaseke C., Poesen J., Vranken L., Mertens K. Landslide resilience in Equatorial Africa: Moving beyond problem identification! In: BELGEO. Issue 1. Societe Belge de Geographie. 2015. DOI: 10.4000/belgeo.15944.

32. Kerimov I.A., Elzhaev A.S. Application of geophysical methods in the study of landslide processes. Geology and Geophysics of Russian South. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 66–83. DOI: 10.46698/VNC.2024.91.39.007. (In Russ.)

33. Korup O., Gorum T., Hayakawa Y. Without power? Landslide inventories in the face of climate change. Earth Surface Processes and Landforms. 2012. Vol. 37. No. 1. pp. 92–99. DOI: 10.1002/esp.2248.

34. Klyuev R.V., Brigida V.S. Improving monitoring of landslide processes on mountain slopes in the presence of transport infrastructure. Geology and Geophysics of Russian South. 2025. Vol. 15. No. 3. pp. 66–78. DOI: 10.46698/VNC.2025.39.32.001. (In Russ.)

35. Kukemilks K., Wagner J.F., Saks T., Brunner P. Physically based hydrogeological and slope stability modeling of the Turaida castle mound. Landslides. 2018. Vol. 15. No. 11. pp. 2267–2278. DOI: 10.1007/s10346-018-1038-5.

36. Kumar M.N., Ramesh M.V. Accurate IoT Based Slope Instability Sensing System for Landslide Detection. IEEE Sensors Journal. 2022. Vol. 22. No. 17. pp. 17151–17161. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3189903.

37. Landslide hazard and risk. Eds. T. Glade, A.G. Malcolm, M.J. Crozier. John Wiley and Sons, Ltd. 2005. 832 p.

38. Liu Y., Huang J., Xiao R., Ma S., Zhou P. Research on a regional landslide early-warning model based on machine learning – a case study of Fujian Province, China. Forests. 2022. Vol. 13. No. 12. DOI: 10.3390/f13122182.

39. Lu N., Godt J. Infinite slope stability under steady unsaturated seepage conditions. Water Resources Research. 2008. Vol. 44. No. 11. DOI: 10.1029/2008WR006976.

40. Marc V., Bertrand C., Malet J.P., Carry N., Simler R., Cervi F. Groundwater-Surface waters interactions at slope and catchment scales: implications for landsliding in clay-rich slopes. Hydrological Processes. 2017. Vol. 31. No. 2. pp. 364–381. DOI: 10.1002/hyp.11030.

41. Mirus B.B., Becker R.E., Baum R.L., Smith J.B. Integrating real-time subsurface hydrologic monitoring with empirical rainfall thresholds to improve landslide early warning. Landslides. 2018. Vol. 15. No. 10. pp. 1909–1919. DOI: 10.1007/s10346-018-0995-z.

42. Nath A., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P. Social vulnerability and spatial adaptation:

A case study of community responses to natural disasters in Silchar, Assam State, India. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 2. pp. 128–141. DOI: 10.46698/VNC.2025.67.58.001. (In Russ.)

43. Oguz E.A., Depina I., Myhre B., Devoli G., Rustad H., Thakur V. IoT-based hydrological monitoring of water-induced landslides: a case study in central Norway. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2022. Vol. 81. No. 5. DOI: 10.1007/s10064-022-02721-z.

44. Oh S., Lu N. Slope stability analysis under unsaturated conditions: Case studies of rainfall-induced failure of cut slopes. *Engineering Geology*. 2015. Vol. 184. pp. 96–103. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.11.007.

45. Priest G.R., Schulz W.H., Ellis W.L., Allan J.A., Niem A.R., Niem W.A. Landslide Stability: Role of Rainfall-Induced, Laterally Propagating, Pore-Pressure Waves. *Environmental and Engineering Geoscience*. 2011. Vol. 17. No. 4. pp. 315–335.

46. Prokesova R., Medvedova A., Taborik P., Snopkova Z. Towards hydrological triggering mechanisms of large deep-seated landslides. *Landslides*. 2013. Vol. 10. No. 3. pp. 239–254. DOI: 10.1007/s10346-012-0330-z.

47. Rahardjo H., Lee T.T., Leong E.C., Rezaur R.B. Response of a residual soil slope to rainfall. *Canadian Geotechnical Journal*. 2005. Vol. 42. No. 2. pp. 340–351. DOI: 10.1139/t04-101.

48. Ran Q., Wang F., Gao J. Modelling effects of rainfall patterns on runoff generation and soil erosion processes on slopes. In: *Water. Switzerland*. 2019. Vol. 11. No. 11. DOI: 10.3390/w11112221.

49. Sidle R.C., Greco R., Bogaard T. Overview of landslide hydrology. In: *Water. Switzerland*. 2019. Vol. 11. Issue 1. MDPI AG. DOI: 10.3390/w11010148.

50. Sun H., Wong L.N.Y., Shang Y., Yu B., Wang Z. Experimental studies of groundwater pipe flow network characteristics in gravelly soil slopes. *Landslides*. 2012. Vol. 9. No. 4. pp. 475–483. DOI: 10.1007/s10346-011-0312-6.

51. Suribabu C.R., Sujatha E.R. Evaluation of moisture level using precipitation indices as a landslide triggering factor—a study of Coonoor Hill Station. *Climate*. 2019. Vol. 7. No. 9. DOI: 10.3390/cli7090111.

52. Thiebes B., Bell R., Glade T., Jager S., Mayer J., Anderson M., Holcombe L. Integration of a limit-equilibrium model into a landslide early warning system. *Landslides*. 2014. Vol. 11. No. 5. pp. 859–875. DOI: 10.1007/s10346-013-0416-2.

53. Wang W., Li J., Li X., Wang Y. Evolution of the hydrogeological structure and disaster-generating mechanisms of landslides in loess slopes of the southern Jingyang Plateau, Shaanxi, China. *Hydrogeology Journal*. 2020. Vol. 28. No. 6. pp. 2223–2239. DOI: 10.1007/s10040-020-02195-x.

54. Wood J.L., Harrison S., Reinhardt L., Taylor F.E. Landslide databases for climate change detection and attribution. *Geomorphology*. 2020. Vol. 355. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107061.

55. Yaitskaya N.A., Dzaganiia L.M., Brigida V.S. Geoecological hazards in context of climate change of territories of Caucasus subtropical zone. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 118–132. DOI: 10.46698/VNC.2023.54.85.010. (In Russ.)

56. Yang K.H., Nguyen T.S., Rahardjo H., Lin D.G. Deformation characteristics of unstable shallow slopes triggered by rainfall infiltration. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2021. Vol. 80. No. 1. pp. 317–344. DOI: 10.1007/s10064-020-01942-4.

57. Zeng T., Yin K., Jiang H., Liu X., Guo Z., Peduto D. Groundwater level prediction based on a combined intelligence method for the Sifangbei landslide in the Three Gorges Reservoir Area. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12(1). DOI: 10.1038/s41598-022-14037-9.

58. Zhang J., Luo Y., Zhou Z., Victor C., Duan M. Research on the rainfall-induced regional slope failures along the Yangtze River of Anhui, China. *Landslides*. 2021. Vol. 18. No. 5. pp. 1801–1821. DOI: 10.1007/s10346-021-01623-7.

DOI: 10.46698/VNC.2026.27.54.001

Original paper

Hypocenter distribution of volcanic earthquakes beneath Mount Sinabung (Oct 2023–Apr 2024) using an adaptive damping Geiger relocation

E. Minarto¹, A. Ditaningrum¹, Kristianto²

¹ Sepuluh Nopember Institute of Technology, Department of Physics,
Surabaya 60111, Indonesia,
e-mail: eko.minarto@its.ac.id, arfi.dita@gmail.com;

² Center for Volcanology and Geological Disaster Mitigation (PVMBG),
57 J. Diponegoro Str., Bandung 40122, Indonesia, e-mail: kristianto02@gmail.com

Received: 29.10.2025, revised: 10.02.2026, accepted: 12.02.2026

Abstract: Relevance. Mount Sinabung has remained one of the most active volcanoes in Indonesia during the past decade, producing recurrent seismic swarms that reflect dynamic subsurface processes. Understanding the spatial distribution of hypocenters is critical for constraining magma transport pathways and assessing volcanic hazards in densely populated regions. **The aim** of this study is to refine the earthquake catalogue for Sinabung by relocating events with improved accuracy, thereby distinguishing shallow brittle-failure processes from deeper magmatic activity. We analyzed 61 volcanic earthquakes recorded between October 2023 and April 2024. Hypocenter relocation was performed using a Geiger least-squares algorithm with adaptive damping, designed to minimize instability in heterogeneous velocity structures. **Methods.** To evaluate robustness, we applied $\pm 10\%$ P-wave velocity sensitivity tests and jackknife resampling of seismic stations. These procedures allowed us to identify well-constrained events and flag model-sensitive cases requiring cautious interpretation. **The results** reveal two distinct hypocenter populations. Shallow VTB events (0.3–2.0 km depth) occur as semi-continuous swarms beneath the summit and upper flanks, consistent with near-surface brittle failure or hydrothermal cracking. In contrast, deeper VTA events (2.5–14 km depth) form several aligned clusters rather than a single source, delineating vertically segmented pathways coherent with conduit structures or mid-crustal magma transport. Epicenters are concentrated within 0–5 km of the summit, highlighting a vertically continuous but segmented plumbing system. These findings provide new constraints on the geometry of magma pathways beneath Sinabung and contribute to improved models of volcanic hazard assessment in northern Sumatra.

Keywords: Mount Sinabung, volcanic earthquake, hypocenter, Geiger method, seismic monitoring.

Acknowledgements: We thank PVMBG Bandung for providing seismic data and station metadata. We acknowledge technical assistance with picking and processing from colleagues in the Department of Physics, Sepuluh Nopember Institute of Technology. This research received no external funding.

For citation: Minarto E., Ditaningrum A., Kristianto. Hypocenter distribution of volcanic earthquakes beneath Mount Sinabung (Oct 2023–Apr 2024) using an adaptive damping Geiger relocation. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 93–108. DOI: 10.46698/VNC.2026.27.54.001

УДК 550.34; 551.21

DOI: 10.46698/VNC.2026.27.54.001

Оригинальная статья

Распределение гипоцентров вулканических
землетрясений под горой Синабунг
(октябрь 2023 г. – апрель 2024 г.)
с использованием адаптивного демпфирования
по методу перемещения Гейгера

Э. Минарто¹, А. Дитанингрум¹, Кристианто²

¹ Институт технологий Сепулук Нопембер, факультет физики, Индонезия,
60111, г. Сурабая, e-mail: eko.minarto@its.ac.id, arfi.dita@gmail.com;

² Центр вулканологии и смягчения геологических опасностей, Индонезия,
40122, г. Бандунг, ул. Дж. Дипонегоро, 57, e-mail: kristianto02@gmail.com

Статья поступила: 29.10.2025, доработана: 10.02.2026, принята к публикации: 12.02.2026

Резюме: Актуальность работы. Вулкан Синабунг остается одним из наиболее активных вулканов Индонезии в течение последнего десятилетия, порождая повторяющиеся рои землетрясений, которые отражают динамические процессы в недрах. Понимание пространственного распределения гипоцентров имеет критическое значение для определения путей транспорта магмы и оценки вулканической опасности в густонаселенных регионах. **Цель данного исследования** – уточнить каталог землетрясений для Синабунга путем переопределения локации событий с повышенной точностью, что позволит различить процессы неглубокого хрупкого разрушения от более глубокой магматической активности. Было проанализировано 61 вулканическое землетрясение, зарегистрированное в период с октября 2023 по апрель 2024 года. **Методы.** Переопределение гипоцентров выполнялось с использованием алгоритма Гейгера по методу наименьших квадратов с адаптивным демпфированием, разработанного для минимизации неустойчивости в неоднородных скоростных структурах. Для оценки надежности были применены тесты на чувствительность к $\pm 10\%$ изменению скорости Р-волн и процедура jackknife-ресэмплинга сейсмических станций. Эти процедуры позволили выявить хорошо определяемые события и отметить чувствительные к модели случаи, требующие осторожной интерпретации. **Результаты.** Результаты выявили две различные популяции гипоцентров. Мелкие события типа VTB (глубина 0,3–2,0 км) образуют почти непрерывные рои под вершиной и верхними склонами, что согласуется с процессами хрупкого разрушения вблизи поверхности или гидротермального растрескивания. В отличие от них, более глубокие события типа VTA (глубина 2,5–14 км) формируют несколько выстроенных в линию кластеров, а не единый источник, очерчивая вертикально сегментированные пути, соответствующие структурам проводящего канала или транспорту магмы в средней коре. Эпицентры сконцентрированы в пределах 0–5 км от вершины, что указывает на вертикально непрерывную, но сегментированную магмоподводящую систему. Эти результаты дают новые ограничения на геометрию магматических путей под Синабунгом и способствуют совершенствованию моделей оценки вулканической опасности на севере Суматры.

Ключевые слова: вулкан Синабунг, вулканическое землетрясение, гипоцентр, метод Гейгера, сейсмический мониторинг.

Благодарности: Авторы благодарят Центр вулканологии и смягчения последствий геологических катастроф (PVMBG, Бандунг) за предоставление сейсмических данных и метаинформации о станциях. Мы также признательны коллегам с кафедры физики Технологического института «Сепулук Нопембер» за техническую помощь в отборе и обработке данных. Данное исследование не получало внешнего финансирования.

Для цитирования: Минарто Э., Дитанингрум А., Кристианто. Распределение гипоцентров вулканических землетрясений под горой Синабунг (октябрь 2023 г. – апрель 2024 г.) с использованием адаптивного демпфирования по методу перемещения Гейгера. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 93-108. DOI: 10.46698/VNC.2026.27.54.001

Introduction

This study implements a rigorously parameterized Geiger relocation workflow with adaptive damping to refine volcano-proximal seismic data from Mount Sinabung (October 2023–April 2024). The approach yields a reproducible, sensitivity-annotated hypocenter catalogue. In contrast to earlier relocations, we employ manually curated P- and S-wave picks with explicit numeric weighting and adaptive damping protocols. Each event is tested with $\pm 10\%$ P-wave velocity perturbations, station jackknife displacement metrics, and covariance estimates to evaluate stability. Conversion scripts and GAD control files are archived to ensure exact reproducibility. These enhancements improve the interpretability of depth classifications, confirm the robustness of a February 2024 deep event under multiple perturbations, and provide operational guidance to PVMBG on station densification strategies and relocation threshold calibration.

Indonesia occupies a complex plate-boundary zone at the junction of the Eurasian, Pacific and Indo-Australian plates [Charlton, 2000], forming a highly active segment of the Pacific Ring of Fire where sustained subduction and related crustal deformation generate prolific magmatism and frequent seismicity. This tectonic setting produces 127 historically active volcanoes distributed across Java, Nusa Tenggara, Bali, Sulawesi, Sumatra and adjacent islands [Hariyono, Liliyasi, 2018], many of which are monitored continuously by the Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation (PVMBG) because of their hazard potential. Mount Sinabung (North Sumatra) is one such monitored system; its eruptive episodes and associated seismic unrest are readily characterized using standard seismological workflows, including manual P- and S-arrival picking and iterative relocation algorithms (e.g., Geiger least-squares), which yield the hypocentral precision required to resolve magma-related seismicity and migration pathways beneath the edifice [Annisa et al., 2021]. Although convergent (subduction) processes are the principal driver of arc volcanism in Indonesia, local extensional and transform strain components modulate crustal fracture networks and fluid pathways that focus magma ascent and control the spatial distribution of volcanic seismicity [O’Har, Karlstrom, 2023].

Mount Sinabung is an andesitic stratovolcano [Gunawan, et al., 2019] in the Karo Highlands, North Sumatra, Indonesia (Fig. 1). After a prolonged quiescence the volcano reactivated in 2010 and has produced repeated eruptive episodes, with notable pulses in 2013–2014 and further activity through 2016 and 2021. Its proximity to populated areas and the frequent occurrence of shallow volcanic earthquakes make Sinabung a priority for continuous monitoring; seismic observations are central to tracking subsurface processes such as magma migration, pressurization of hydrothermal systems, and fracturing associated with volcanic unrest [Nakada et al., 2019].

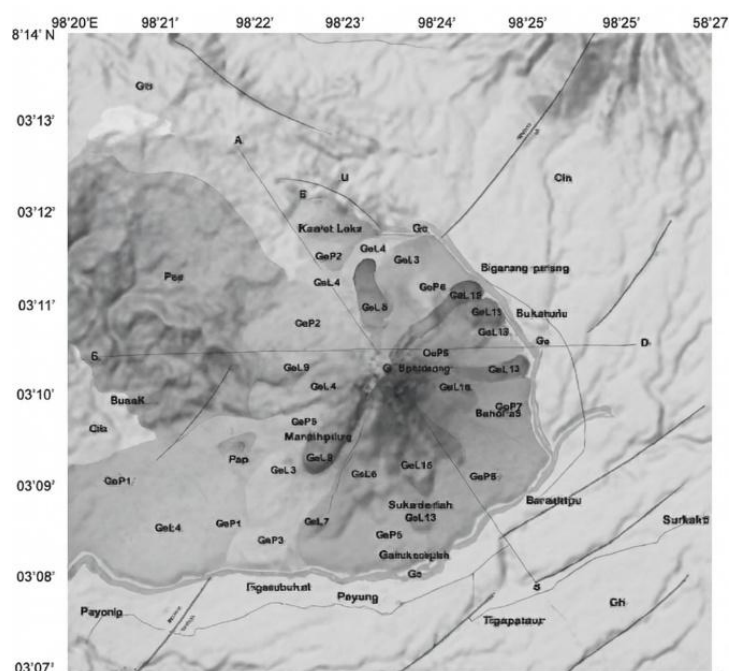


Fig. 1. Geological map of Mount Sinabung

Accurate determination of hypocenter distributions beneath Sinabung provides crucial constraints on shallow magma and fluid pathways, faulting within the volcanic plumbing system, and the depth ranges over which seismic energy is released [Kusumo et al., 2025]. These constraints are directly relevant to hazard assessment and mitigation because they help distinguish shallow hydrothermal or fracture-related seismicity from deeper magmatic signals that may precede eruptive behavior. Locating volcanic earthquakes is challenging: events are typically shallow and emergent, pick uncertainties are larger than for tectonic earthquakes, and results are sensitive to local station geometry and velocity-model assumptions.

The Geiger iterative travel-time inversion remains a widely used and computationally efficient method for routine earthquake location [Karasozen, Karasozen, 2020]. Modern implementations that incorporate stabilizing measures such as adaptive damping reduce non-physical jumps and improve convergence in sparse or noisy networks, yielding more robust hypocenter clouds for volcanic settings. Building on previous relocations at Sinabung [Sutawidjaja et al., 2013], this study applies the Geiger iterative least-squares method with adaptive damping (GAD) to earthquakes recorded between October 2023 and April 2024. We classify events by depth, present detailed spatial and depth distributions, quantify location quality and sensitivity, and compare our results with earlier studies to draw implications for operational monitoring and near-field hazard mitigation.

Disaster mitigation minimizes the adverse consequences of hazards through a combination of preparedness and long-term risk-reduction measures [Senathirajah et al., 2023]. Mitigation interventions may be implemented before, during, or after an event; under Law No. 24 of 2007, actions at any of these stages are recognized as mitigation. Preparedness comprises proactive activities that reduce vulnerability and strengthen response capacity, including public information campaigns and the dissemination of clear evacuation routes and rescue procedures to ensure timely and effective action during emergencies [Bakhshian, Martinez-Pastor, 2023].

Data

Network and instruments

Seismic data were obtained from a local network of seven broadband and short-period stations operated by PVMBG Bandung and deployed around Mount Sinabung to maximize azimuthal coverage of the edifice. Metadata for each station, including code, coordinates, elevation, sensor type, and sampling rate, are summarized in Table 1. Station siting prioritized low-noise environments on competent ground, with reliable power and telemetry to enable near real-time data transfer. Sensor orientation and installation depth followed PVMBG standards to minimize environmental and cultural noise. Timing at all stations was synchronized to GPS clocks and verified through routine metadata audits, ensuring sub-millisecond accuracy required for robust travel-time based location and relocation analyses.

Table 1

Station code, latitude, longitude, elevation, sensor type, and sampling rate^a

Station Name/ code	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Elevation (m)	Sensor type	Sampling rate (Hz)
Sukanalu SKN	3.1700	98.3920	1200	Broadband (STS-2)	100
Lau Kawar LKW	3.1805	98.3850	950	Short-period (2 Hz)	100
Gamber GBR	3.1580	98.4015	1350	Broadband (CMG-3T)	100
Sibayak SBY	3.1900	98.4100	1100	Short-period (1 Hz)	100
Mardinding MDD	3.1625	98.3760	900	Broadband (Trillium 120)	100
Kebayaken KBY	3.1755	98.4055	1400	Short-period (2 Hz)	200
Sigarang-Garang SGR	3.1500	98.3890	1000	Broadband (STS-2)	100

Recording instrumentation comprised a mix of broadband sensors (for low-frequency energy and waveform completeness) and high-gain short-period sensors (for improved signal-to-noise on emergent volcanic phases), digitized at sampling rates listed in Table 1. Before relocation, continuous records were visually inspected and subjected to automated quality control: instrument response removal, bandpass filtering tailored to expected P- and S-phase frequency content, and manual or semi automatic pick review to flag low-quality or ambiguous arrivals. We quantified station sensitivity and azimuthal coverage, and we evaluated network performance metrics (detection completeness, pick residual distributions) to inform data weighting and damping choices in the Geiger iterative inversion, following best practice recommendations for optimizing hypocenter resolution in small, volcano-focused networks.

Recording period and picks

Continuous waveform records from 1 October 2023 to 30 April 2024 were inspected in Swarm to compile a high-quality arrival dataset. Traces were reviewed station-by-station with variable time windows to capture both isolated and clustered events, while spectral and time-domain displays aided identification of emergent phases and suppression of

coherent noise. Narrow-band filtering (1–10 Hz for short-period volcanic phases; 0.5–5 Hz for broadband low-frequency signals) ensured consistent phase recognition across the network.

P and S arrival times were picked manually to maximise consistency and to avoid systematic bias introduced by automatic pickers in low signal-to-noise situations [Kato et al., 2025]. Each pick record includes the station code, phase identifier (P or S), UTC pick time, and a discrete pick-quality flag. Pick quality was assigned on a three-tier scale: high (clear first arrival, uncertainty ≤ 0.02 s), medium (moderately emergent or low SNR, uncertainty 0.02–0.1 s), and low (ambiguous or strongly emergent, uncertainty > 0.1 s). Picks flagged as low quality were retained in the master file for completeness but down-weighted in subsequent inversion and sensitivity analyses.

Arrival picks were exported from Swarm as Arrival.dat and converted to the Geiger adaptive damping (GAD) input format using a reproducible conversion script. The conversion step verified station codes against the metadata table, standardized time stamps to ISO-8601 UTC, and propagated the pick-quality flags into the GAD weighting scheme. Prior to inversion, we performed a final quality control pass that removed obvious outliers, corrected inconsistent station polarity or phase labels, and ensured that each event had a minimum of four high- or medium-quality picks. This conservative selection protocol underpins the robustness and interpretability of the relocated hypocenter catalogue [Bourne et al., 2014].

Inclusion criteria and quality control

Events were selected for relocation only when they satisfied the Geiger adaptive damping minimum pick requirements [Nakamichi et al., 2014], specifically a minimum of three independent P picks and the network's baseline total-pick threshold. Initial GAD solutions returning root-mean-square travel-time residuals greater than 0.20 s were flagged for manual review and repicking; repicking prioritized improving high-quality P arrivals, adding clear S picks where possible, and reconciling mislabelled or time-shifted arrivals. When repicking failed to reduce residuals below the acceptance threshold, the event was excluded from the relocated catalogue.

Quality control followed an explicit and reproducible workflow. Automated checks verified station-code consistency with the metadata table, removed duplicate or implausible picks, and enforced minimum azimuthal coverage to ensure stable location geometry. Manual inspection then evaluated pick coherency across the network and applied discrete quality flags to derive per-pick weights for the GAD inversion. Final solutions were retained only when they achieved $\text{RMS} \leq 0.20$ s and met secondary diagnostics, including realistic depth bounds, acceptable formal location uncertainties, and the absence of gross travel-time outliers in the residual distribution.

Robustness and sensitivity of the retained catalogue were assessed through jackknife and bootstrap resampling, velocity model perturbations, and propagation of pick-quality weights to derive realistic uncertainty estimates for hypocenters. The final vetted catalogue, with associated quality metrics, is provided in Table S3 to ensure transparency and enable reuse in hazard and process studies.

Data provenance and availability

Raw seismic waveforms analyzed in this study are owned by the Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation (PVMBG) and subject to PVMBG's data-sharing policy. Processed products – including arrival lists, GAD input/output files, relocated hypocenter catalogue, pick-quality flags, and metadata tables – are provided as Supplementary Material. Full data packages and reproducible scripts are archived and available from the corresponding author or directly from PVMBG upon request, subject to PVMBG's access conditions.

Methods

Seismic wave types and properties

Seismic waves are elastic disturbances that propagate through Earth materials and generate time-varying strain and particle motion [Yang, 2014]. These disturbances result from an interaction between the initiating force and the medium's elastic restoring stresses, producing oscillatory motion that can be decomposed into longitudinal (compressional) and transverse (shear) components. Many seismic phases are combinations of these fundamental modes, each with distinct propagation speed, attenuation behaviour, frequency content, and implications for observed ground motion at the surface.

Body waves travel through Earth's interior and carry information about subsurface structure [Zhang, 2016]. Primary (P) waves are compressional, with particle motion parallel to wave propagation; they travel fastest and are the first arriving phase at seismic stations. Secondary (S) waves are shear, with particle motion perpendicular to propagation; they do not travel through fluids and therefore provide complementary constraints on rigidity and the presence of melts or fluids [Shayakhmetov et al., 2023]. Relative arrival times and amplitude decay of P and S phases are primary observables for hypocentre determination and local velocity-model calibration.

Surface waves propagate along the Earth's free surface and typically dominate ground motion at longer periods and larger epicentral distances [Bowden, Tsai, 2017]. Rayleigh waves involve retrograde elliptical particle motion in the vertical plane and sample both near-surface compressional and shear properties, making them sensitive to crustal shear-wave structure [Marghany, 2021]. Love waves are horizontally polarized shear waves trapped near the surface and are especially sensitive to lateral and vertical contrasts in shear velocity [Zhang et al., 2021]. Surface-wave dispersion and attenuation provide independent constraints on shallow structure that complement body-wave location analyses.

Volcanic versus tectonic seismicity and classification

Earthquakes can be broadly classified by their causative mechanisms into tectonic and volcanic events [Van Der et al., 2022]. Tectonic earthquakes arise from brittle failure on faults driven by regional stress fields, whereas volcanic earthquakes are primarily driven by transient processes related to magmatic and hydrothermal systems: magma ascent, pressurization and depressurization of fluid phases, fracturing induced by volatile exsolution, and conduit or dome collapse. Volcanic seismicity commonly exhibits emergent onsets, low signal-to-noise ratios, and a prevalence of shallow focal depths, all of which complicate phase picking and location [Manzo et al., 2024].

Volcanic earthquakes are often categorised by their waveform and spectral characteristics into families such as deep volcanic, shallow volcanic, hybrid, low-frequency (LP), volcano-tectonic (VT), tremor, and long-period (LP) events. Deep volcanic events typically originate beneath the edifice at depths greater than a few kilometres and are commonly associated with magma movement at depth, whereas shallow volcanic events occur within the uppermost crust (commonly within ~0–2 km beneath the surface) and frequently reflect near-surface fracturing or hydrothermal interactions [Kulhanek, 2002]. Hybrid events combine impulsive high-frequency and emergent low-frequency energy and often indicate fluid-rock interactions. Continuous tremor and LP signals are generally associated with resonant or sustained fluid flow in conduits or hydrothermal fractures; their presence and spectral content are key indicators of changes in pressurization and flow regimes.

An earthquake's hypocentre (focus) is its subsurface point of origin where rupture or the source process initiates [Jain, 2014]; the epicentre is the surface projection directly above the hypocentre [Lomax et al., 2009]. Depth classification is a standard descriptor

for seismic catalogues and is important for discriminating physical processes and hazard implications. For global tectonic contexts, depth classes are commonly defined as shallow (< 70 km), intermediate (70–300 km), and deep (> 300 km), although volcanic-site studies typically use much finer, site-specific depth ranges to separate near-surface (0–2 km), shallow crustal (2–10 km), and deeper crustal sources depending on the local geology and the instrument network resolution.

Clear and consistent definitions of depth classes, combined with robust uncertainty estimates on depth and horizontal location, are essential when interpreting seismicity beneath volcanoes. Because volcanic events are frequently shallow and emergent, quantifying formal location uncertainties, sensitivity to the velocity model, and station coverage is critical for reliable source discrimination and for translating hypocentre patterns into physical interpretations of magma and fluid migration.

Geiger method and adaptive damping

The Geiger method locates earthquake hypocenters by iteratively minimizing misfit between observed and theoretical travel times using a least-squares update [Luo et al., 2023]. Input requirements comprise station coordinates, P and S arrival times, and a trial velocity model. Each iteration linearizes the travel-time problem about the current hypocenter and origin-time estimate and computes corrective updates to reduce travel-time residuals, thereby closing the gap between observed and calculated arrival times.

For an observation i the travel-time residual r_i is the difference between the observed arrival time $t_{obs,i}$ and the calculated travel time $t_{calc,i}$ for the current model. Linearizing $t_{calc,i}$ with respect to small perturbations in origin time and hypocentre coordinates yields the standard Gauss–Newton form. In compact notation, the residual is expressed as

$$r_i \approx \frac{\partial t}{\partial x_i} \Delta x + \frac{\partial t}{\partial y_i} \Delta y + \frac{\partial t}{\partial z_i} \Delta z + \Delta t$$

where, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ are coordinate corrections and Δt is the origin-time correction. The partial derivatives $\partial t / \partial x_i$ form the Jacobian matrix G and are evaluated using ray-path geometry for the adopted velocity model. These derivatives quantify the sensitivity of each pick to changes in hypocentre and origin time and are central to computing robust updates [Brocher, 2008].

The linearized system is written as $G \Delta m = d$, where Δm is the vector of parameter updates $(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t)$ and d contains the travel-time residuals. To stabilise inversion in the presence of limited azimuthal coverage, emergent phases, or velocity-model uncertainty, the system is solved in damped least-squares form:

$$(G^T G + \lambda I) \Delta m = G^T d,$$

where, $\Delta \lambda$ is the damping parameter and I is the identity matrix. Adaptive damping adjusts $\Delta \lambda$ between iterations to balance fit and model stability: reducing $\Delta \lambda$ when updates yield consistent residual reductions and increasing $\Delta \lambda$ when updates produce non-physical parameter jumps. This Geiger adaptive damping (GAD) approach improves convergence and yields more stable hypocentre clouds in sparse or noisy volcanic networks [Lienert et al., 1986].

Implementation and convergence criteria

Practical implementation requires careful weighting of picks according to quality, per-pick uncertainties, and station geometry. We propagate pick weights into the normal equations by multiplying each row of G and corresponding residual by the square root of the weight. Iterations proceed until both the maximum parameter update $|\Delta m|$ and the RMS residual change fall below predefined tolerances or until a maximum number of

iterations is reached. Post-inversion diagnostics include residual histograms, azimuthal gap checks, formal covariance estimates derived from $(\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1}$, and sensitivity tests that perturb the velocity model or omit individual stations to assess robustness [Diaz, 2016].

Time-frequency transforms such as the S-transform are used to characterise signal content, guide manual picking, and separate overlapping phases prior to location. The S-transform provides a time-localized spectral representation that preserves phase information and scales adaptively with frequency, improving identification of emergent P and S onsets in noisy volcanic records. Reliable picks informed by time-frequency analysis reduce systematic errors in G and d, thereby improving the fidelity and interpretability of GAD relocations [Zhang, 2016].

Results

Event counts and classification

Between 01 October 2023 and 30 April 2024 we relocated and vetted 61 volcanic earthquakes that satisfied the GAD inclusion and quality criteria. Events were classified by focal depth into two operational categories chosen to reflect processes relevant to Sinabung monitoring: VTB (shallow volcanic-tectonic), depth < 2.0 km, and VTA (deep volcanic-tectonic), depth ≥ 2.0 km. These thresholds were selected to separate near-surface fracturing and hydrothermal interactions from deeper magmatic or plumbing-related sources, consistent with local structural interpretations and the network's vertical resolution (Table 2).

Table 2

Velocity model, resolution tests, and justification

Layer (top–bottom km)	V_p (km s ⁻¹)	V_s (km s ⁻¹)	Vertical resolution (Δz , km)	Sensitivity (depth shift for $\pm 10\%$ V_p , km)
0.00–0.50	2.00	1.15	0.2	± 0.05
0.50–2.00	2.40	1.38	0.3	± 0.10
2.00–5.00	3.50	2.02	0.6	± 0.25
5.00–15.00	4.50	2.60	1.0	± 0.50
>15.00	5.70	3.30	— (poor constraint)	$> \pm 1.0$

Monthly counts and basic summary statistics are presented in Table 3. Across the study interval we identify 34 VTA and 27 VTB events. Temporal behaviour shows that VTA events dominated the early part of the record, while VTB proportions increased during months with elevated near-summit activity; this partitioning suggests alternating periods of deeper source activity and intensified shallow fracturing. We quantified month-to-month variability using Poisson confidence intervals on counts and tested for non-stationarity with a simple χ^2 test comparing observed monthly counts against a homogeneous Poisson null model; significance and p-values.

Table 3

Classification of earthquake events that occurred on Mount Sinabung[†]

No	Dates	Amounts	Types of Earthquakes
1	October 2023	6	Deep Earthquake
		7	Shallow earthquake
2	November 2023	2	Deep Earthquake

		6	Shallow earthquake
3	December 2023	6	Deep Earthquake
		3	Shallow earthquake
4	January 2024	6	Deep Earthquake
		8	Shallow earthquake
5	February 2024	4	Deep Earthquake
		1	Shallow earthquake
6	March 2024	4	Deep Earthquake
		0	Shallow earthquake
7	April 2024	6	Deep Earthquake
		2	Shallow earthquake

Each event entry in the catalogue includes event time, geographic coordinates, depth, RMS, number of picks, and formal uncertainty estimates derived from the damped covariance matrix and from station jackknife tests. Classification robustness was assessed by: (1) propagating depth uncertainties to evaluate the fraction of events with depth overlap across the 2.0 km threshold, and (2) performing velocity-model perturbation tests ($\pm 10\%$ V_p) to bound systematic depth shifts. Where depth uncertainty caused ambiguous classification, events were flagged in the catalogue and treated separately in aggregated statistics. Reporting these metrics ensures that interpretations linking depth classes to physical processes explicitly account for the limits of the local network and velocity model.

Event catalogue and location quality

The complete relocated event catalogue is provided in Table 4 and contains UTC origin time, latitude, longitude, depth (km), RMS residual (s), number of picks, pick-quality summary, and formal uncertainty estimates for each entry. Table 4 also lists diagnostic fields used in quality assessment, including azimuthal gap, minimum and maximum station distances, and the per-event covariance trace so readers can reproduce selection thresholds and perform independent filtering.

Accepted locations satisfy a conservative quality threshold of $\text{RMS} \leq 0.20$ s. Events failing to meet this threshold after repicking were excluded from the final catalogue. The typical number of picks per retained event ranged from 4 to 12; events recorded on larger station subsets systematically display lower RMS, reduced formal covariance, and smaller confidence ellipses in horizontal position. To preserve transparency we report both the unweighted and weighted RMS values and provide per-pick weights in the Supplementary files so users may reweight or rerun inversions as required.

Depth sensitivity varies systematically with focal depth and network geometry. Shallow events (~ 2 km) show relatively stable depth estimates with smaller formal vertical uncertainties under the adopted layered 1-D model, while deeper events exhibit larger vertical shifts under modest velocity perturbations and larger covariance in z . We quantify this behaviour in S3 by reporting the vertical variance and by providing results from $\pm 10\%$ V_p perturbation tests and station jackknife runs for each event. For events with depth uncertainties that overlap the VTB/UTA classification threshold, entries are flagged and users are cautioned when attributing physical processes to those particular depths.

Post-processing diagnostics accompany each catalogue entry. These include residual histograms, per-station residual summaries, and azimuthal-coverage metrics that identify events with potentially biased solutions (for example, high azimuthal gap or strongly unequal

station distribution). We include guidance in the README on how to apply additional selection criteria (e.g., minimum number of high-quality picks, maximum azimuthal gap) to produce subsets tailored to specific analyses, such as focal-mechanism studies or fine-scale migration mapping.

Table 4

Relocated event catalogue

Event ID	UTC origin time	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	RMS (s)	Number of picks	Pick-quality summary	Covariance trace (km ²)	Azimuthal gap (°)
EVT_0001	2023-10-03T02:14:12.345Z	3.1712	98.3928	0.45	0.12	8	6H,2M	0.0021	84
EVT_0002	2023-10-07T11:05:47.120Z	3.1698	98.3940	2.35	0.15	6	4H,2M	0.0087	96
EVT_0003	2023-10-15T18:23:09.987Z	3.1745	98.3906	1.10	0.09	10	8H,2M	0.0013	72
EVT_0004	2023-11-01T04:56:33.210Z	3.1669	98.3972	3.80	0.18	7	5H,2M	0.0154	140
EVT_0005	2023-11-20T21:42:02.004Z	3.1720	98.3899	0.20	0.11	9	7H,2M	0.0010	60
EVT_0006	2023-12-05T13:09:58.460Z	3.1704	98.3956	2.90	0.16	5	3H,2M	0.0106	110
EVT_0007	2023-12-18T07:34:21.889Z	3.1758	98.3883	0.85	0.07	12	10H,2M	0.0009	48
EVT_0008	2024-01-09T00:11:44.512Z	3.1685	98.4001	4.50	0.20	6	4H,2M	0.0217	160
EVT_0009	2024-02-02T15:28:30.333Z	3.1733	98.3915	1.75	0.13	8	6H,2M	0.0038	82
EVT_0010	2024-02-	3.16	98.3	2.05	0.14	7	5H,2	0.0075	98

Notes:

- Pick-quality summary: H = high quality pick; M = medium quality pick; L = low quality pick.
- Covariance trace reports the trace of the parameter covariance submatrix for spatial coordinates (proxy for combined location uncertainty); units in km².
- Azimuthal gap is the largest back-azimuthal gap in degrees for stations used in the solution.

Spatial distribution and Cross-sections

Epicentres are tightly clustered around the volcanic edifice, with the majority of events occurring within a radial distance of approximately 0–5 km from the summit (Fig. 2). The plan-view pattern shows a primary concentration on the upper flank and a secondary, more diffuse cluster extending downslope to the north-west, consistent with shallow fracturing and conduit-proximal stress release. Station coverage and topographic shadowing are reported in Table 2 and were considered when interpreting lateral density variations to avoid over-interpreting apparent gaps caused by network geometry.

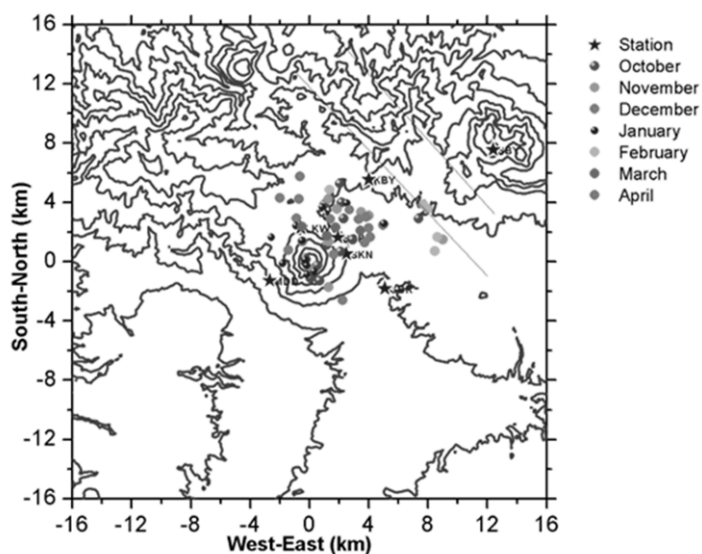


Fig. 2. Distribution of epicenters for October 2023–April 2024 on Mount Sinabung

Orthogonal cross-sections oriented west-east and south-north (Fig. 3a, 3b) delineate two vertically distinct hypocentre populations. Shallow VTB events are concentrated between ~ 0.3 and 2.0 km depth, forming tight, semi-continuous swarms beneath the summit and upper flanks. Their distribution is consistent with near-surface brittle failure or hydrothermal cracking within the edifice. In contrast, deeper VTA events define a separate cluster population between ~ 2.5 and 14 km depth, spatially coherent with deeper conduit structures or mid-crustal magma-transport pathways. Rather than a single point source, the deep population is resolved into several aligned clusters, suggesting vertical segmentation of the plumbing system or the presence of multiple focal zones.

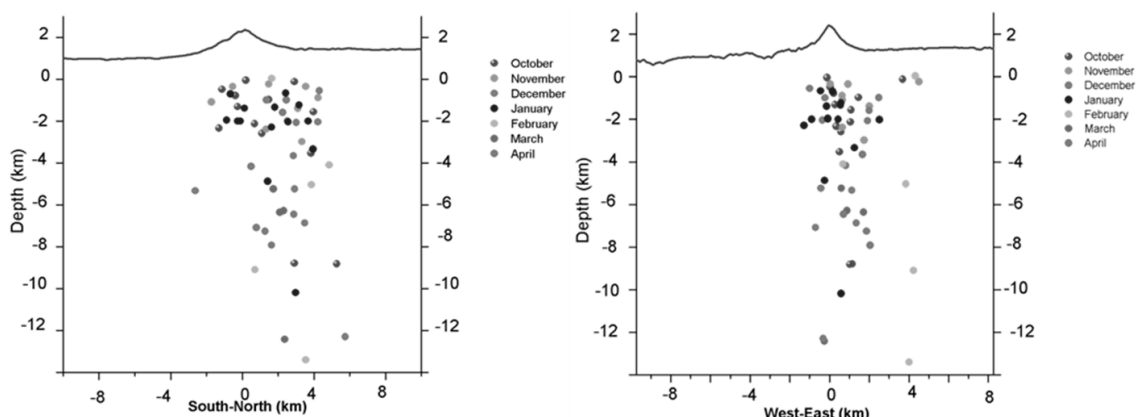


Fig. 3. Distribution of hypocentres recorded between October 2023 and April 2024, shown in orthogonal cross-sections: south–north (a) and west–east (b)

The deepest relocated event in the catalogue occurred in February 2024 at an estimated depth of ~ 14 km; this event is reported with its full uncertainty metrics in Table 3 and was robust to $\pm 10\%$ V_p perturbation tests and station jackknife runs. Although deeper events exhibit larger formal vertical uncertainties, the February event remained classified as VTA under all sensitivity tests and indicates magmatic or deep crustal processes active beneath the edifice during the study period.

The depth histogram (Fig. 4) exhibits a clear bimodal distribution that matches the operational VTB (shallow) and VTA (deep) classifications. This bimodality supports a two-

tier source model in which shallow, summit-proximal fracturing and deeper, plumbing-related processes operate concurrently but at distinct depths. We quantify the separation by reporting the kernel-density estimate and the fraction of events with overlapping 2 km threshold uncertainty in Table 3; these metrics indicate that the bimodal signature is robust to plausible velocity-model and pick-uncertainty perturbations. Together, plan-view clustering and cross-sectional segmentation provide a consistent structural framework for interpreting magma and fluid migration beneath the volcano.

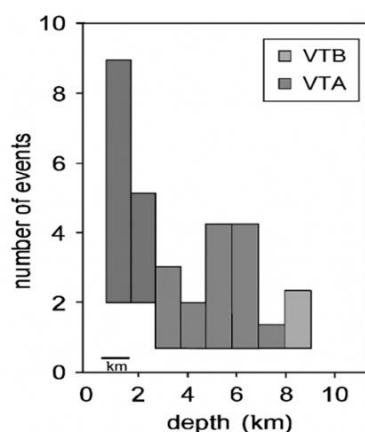


Fig. 4. Distribution of the depth histogram for October 2023–April 2024

Sensitivity test outcomes

Perturbing the adopted V_p model by $\pm 10\%$ yields depth shifts that scale with focal depth: shallow VTB events show shifts typically < 1 km, whereas the deepest VTA events can shift by up to $\sim 1\text{--}3$ km under these perturbations. Jackknife tests that systematically remove single stations reveal that horizontal location sensitivity increases markedly for events with poor azimuthal coverage; events recorded by six or more stations remain robust, exhibiting only minor positional changes in both horizontal and vertical components. Complementary synthetic experiments and interval-velocity sensitivity analyses indicate that V_p/V_s and layer thickness trade-offs primarily control vertical resolution and that shallow layers are generally better constrained by the local network than deeper crustal layers.

These outcomes justify the operational depth classification and the conservative quality thresholds applied to the catalogue: events with depth shifts or jackknife-induced relocations that cross the 2.0 km classification boundary are flagged and excluded from depth-sensitive process interpretations. We report per-event sensitivity metrics ($\pm 10\%$ V_p depth shifts, jackknife displacement statistics, and formal covariance traces) in Table 2 so that readers can independently assess which events are robust for plumbing-system inference and which require cautious interpretation.

Discussion

Seismotectonic interpretation and implications

Hypocenter clustering beneath the summit and vertically coherent alignments indicate a segmented magmatic plumbing system at Sinabung. Shallow VTB events (≤ 2 km) reflect brittle failure in a pressurized near-surface hydrothermal or conduit environment, whereas deeper VTA events (to ~ 14 km) delineate fracture networks accommodating magma ascent and stress transfer. The bimodal depth distribution highlights multi-stage storage and intermittent transfer, with phases of deep activity potentially presaging shallow fracturing, enhanced degassing, and elevated eruption probability if pathways become connected.

Local network geometry and velocity-model trade-offs constrain vertical resolution and introduce systematic depth uncertainty; events crossing classification thresholds under $\pm 10\%$ V_p perturbations or jackknife relocations are therefore interpreted with caution. Strengthening the seismotectonic framework will require denser upper-flank arrays, joint seismic–geodetic inversions, finite-frequency depth refinement, and continuous spectral monitoring to better discriminate brittle failure, fluid resonance, and magmatic intrusion.

Comparison with previous studies

Our relocated hypocenter distribution reproduces the shallow- to mid-crustal bands reported in earlier studies (2016, 2021), with a clear bimodal pattern of shallow VTB events (≤ 2 km) and deeper VTA events extending several kilometres into the mid-crust. The emergence of deeper VTA activity in February 2024 suggests episodic stress-state changes not evident in earlier periods. Absolute depths remain sensitive to the adopted 1-D velocity model and station geometry; $\pm 10\%$ V_p perturbations and jackknife tests reveal systematic shifts of up to several kilometres for the deepest events. We therefore regard these deepest locations as robust indicators of deep-seated activity but emphasize caution in assigning precise values. Targeted dense-array deployments and joint seismic–geodetic inversions are needed to confirm and refine these depths.

Method limitations and monitoring implications

The principal limitations are the 1-D velocity model and incomplete azimuthal coverage. Geiger linearization presumes small perturbations and depends on initial guesses and travel-time accuracy; adaptive damping stabilizes inversions but cannot eliminate systematic biases. Consequently, depth estimates – especially for the deepest VTA events – carry uncertainties of several kilometres under plausible V_p perturbations. Covariance and jackknife diagnostics identify which events are robust and which are model-sensitive. To reduce bias and improve depth fidelity, we recommend tomographic or full-waveform inversion using dense local data and incorporating surface-wave and receiver-function constraints.

The relocated hypocenter patterns and monthly event rates have direct operational value for PVMBG. Strategic station densification along NW–SE and NE–SW transects will reduce azimuthal gaps and halve horizontal uncertainties. Routine automated relocations with updated velocity models, accompanied by per-event sensitivity metrics, should be integrated with deformation, gas-flux, and visual observations to detect coupled signals preceding transitions from deep activity to shallow unrest. These measures will strengthen eruption forecasting and provide clearer, evidence-based triggers for alert-level decisions.

Conclusions

Sixty-one volcanic earthquakes were located beneath Mount Sinabung (Oct 2023–Apr 2024): 34 deep VTA events at 2.5–14 km and 27 shallow VTB events at 0.3–2 km.

Epicenters cluster within ~ 0 –5 km of the summit; cross-sections reveal vertically continuous hypocentre pathways consistent with magma-related processes.

Location quality was controlled by RMS thresholding and repicking; sensitivity tests show greater depth uncertainty for deep events due to velocity-model trade-offs.

Recommendations: densify the seismic network to improve azimuthal coverage; refine velocity models via tomography or full-waveform inversion; maintain routine hypocentre relocations to strengthen monitoring and hazard mitigation.

Data availability

Arrival picks (Arrival.dat), station metadata (station.dat), velocity model (Table S2), GAD outputs (Result.dat), and plotting scripts are available from PVMBG Bandung upon reasonable request subject to their data-sharing policy.

References

1. Gunawan H., Surono, Budianto A., Kristianto et al. Overview of the eruptions of Sinabung Volcano, 2010 and 2013–present and details of the 2013 phreatomagmatic phase. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2019. Vol. 382. pp. 103–119. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2017.08.005.
2. Annisa Y., Astriyan G.C., Wahyunia S., Indrastuti N., Massinai M.F.I. Determination of hypocenter using Geiger method in Sinabung Volcano, April-July 2016 period. In: *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 873. No. 1. Art. No. 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/873/1/012007.
3. Bakhshian E., Martinez-Pastor B. Evaluating human behaviour during a disaster evacuation process: A literature review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2023. Vol. 10. Issue 4. pp. 485–507. DOI: 10.1016/j.jtte.2023.04.002.
4. Bourne S.J., Oates S.J., Van Elk J., Doornhof D. A seismological model for earthquakes induced by fluid extraction from a subsurface reservoir. *JGR Solid Earth*. 2014. Vol. 119. Issue 12. pp. 8991–9015. DOI: 10.1002/2014JB011663.
5. Bowden D.C., Tsai V.C. Earthquake ground motion amplification for surface waves. *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44. No. 1. pp. 121–127. DOI: 10.1002/2016GL071885.
6. Brocher T.M. Key elements of regional seismic velocity models for long period ground motion simulations. *Journal of Seismology*. 2008. Vol. 12. No. 2. pp. 217–221. DOI: 10.1007/s10950-007-9061-3.
7. Charlton T.R. Tertiary evolution of the Eastern Indonesia Collision Complex. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2000. Vol. 18. Issue 5. pp. 603–631. DOI: 10.1016/S1367-9120(99)00049-8.
8. Diaz J. On the origin of the signals observed across the seismic spectrum. *Earth-Science Reviews*. 2016. Vol. 161. pp. 224–232. DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.07.006.
9. Hariyono E., Liliarsari S. The characteristics of Volcanic Eruption in Indonesia. In: *Volcanoes – geological and geophysical setting, theoretical aspects and numerical modeling, applications to industry and their impact on the human health*. Ed. G. Aiello. InTech. 2018. DOI: 10.5772/intechopen.71449.
10. Jain S. Earthquakes. In: *Fundamentals of Physical Geology*. In: Springer Geology. New Delhi. Springer India. 2014. pp. 337–369. DOI: 10.1007/978-81-322-1539-4_15.
11. Karasozen E., Karasozen B. Earthquake location methods. *International Journal on Geomathematics*. 2020. Vol. 11. No. 1. Art. No. 13. DOI: 10.1007/s13137-020-00149-9.
12. Katoh S., Iio Y., Nagao H., Katao H., Sawada M., Tomisaka K. SegPhase: development of arrival time picking models for Japan's seismic network using the hierarchical vision transformer. *Earth Planets Space*. 2025. Vol. 77. Art. No. 118. DOI: 10.1186/s40623-025-02249-y.
13. Kulhanek O. 21 The structure and interpretation of seismograms. In: *International Geophysics*. Vol. 81. Elsevier. 2002. pp. 333–348. DOI: 10.1016/S0074-6142(02)80224-8.
14. Kusumo A.W., Azuma H., Watanabe T., Oda Y. Seismic tomography for subsurface structures imaging beneath Hachijojima Volcanic Island, Izu-Bonin Arc, Japan. *Journal of Seismology*. 2025. Vol. 29. No. 4. pp. 855–873. DOI: 10.1007/s10950-025-10309-9.
15. Lienert B.R., Berg E., Frazer L.N. Hypocenter: An earthquake location method using centered, scaled, and adaptively damped least squares. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1986. Vol. 76. No. 3. pp. 771–783. DOI: 10.1785/BSSA0760030771.
16. Lomax A., Michelini A., Curtis A. Earthquake Location, Direct, Global-Search Methods. In: *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Ed. R.A. Meyers. New York. NY. Springer New York. 2009. pp. 1–33. DOI: 10.1007/978-3-642-27737-5_150-2.
17. Luo Z., Shang X., Wang Y., Li X., Liu I.-H., Tai Y. P- and S-wave arrival time combined Bayesian location method for a microseismic event. *Journal of Central South University*. 2023. Vol. 30. No. 11. pp. 3808–3820. DOI: 10.1007/s11771-023-5459-5.
18. Manzo R., Cesca S., Galluzzo D., La Rocca M., Picozzi M., Di Maio R. Source analysis of low frequency seismicity at Mt. Vesuvius by a hybrid moment tensor inversion. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2024. Vol. 454. Art. No. 108173. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2024.108173.
19. Marghany M. Wavelet transform and particle swarm optimization algorithms for automatic detection of internal wave from synthetic aperture radar. In: *Nonlinear Ocean Dynamics*. Elsevier. 2021. pp. 247–274. DOI: 10.1016/B978-0-12-820785-7.00005-8.

20. Nakada S., Zaennudin A., Yoshimoto M., Maeno F. et al. Growth process of the lava dome/flow complex at Sinabung Volcano during 2013–2016. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2019. Vol. 382. pp. 120–136. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2017.06.012.
21. Nakamichi H., Ukawa M., Sakai S. Precise hypocenter locations of midcrustal low-frequency earthquakes beneath Mt. Fuji, Japan. *Earth, Planets and Space*. 2014. Vol. 56. No. 11. pp. e37–e40. DOI: 10.1186/BF03352542.
22. O'Hara D., Karlstrom L. The arc-scale spatial distribution of volcano erosion implies coupled magmatism and regional climate in the Cascades arc, United States. *Frontiers in Earth Science*. 2023. Vol. 11. Art. No. 1150760. DOI: 10.3389/feart.2023.1150760.
23. Senathirajah K., Bonner M., Schuyler Q., Palanisami T. A disaster risk reduction framework for the new global instrument to end plastic pollution. *Journal of Hazardous Materials*. 2023. Vol. 449. Art. No. 131020. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.131020.
24. Shayakhmetov S.B., Kalpenova Z.D., Lesov K.S., Umarov Kh.K. Rayleigh and love surface waves with regard to seismic stress state of earth bed. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 401. Art. No. 01077. DOI: 10.1051/e3sconf/202340101077.
25. Sutawidjaja I.S., Prambada O., Siregar D.A. The August 2010 Phreatic Eruption of Mount Sinabung, North Sumatra. *Indonesian Journal on Geoscience*. 2013. Vol. 8. No. 1. pp. 55–61. DOI: 10.17014/ijog.8.1.55-61.
26. Van Der Laat L., Mora M.M., Fco. Pacheco J., Lesage P., Meneses E. Seismicity during the recent activity (2009–2020) of Turrialba volcano, Costa Rica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2022. Vol. 431. Art. No. 107651. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2022.107651.
27. Yang W. From Elastic Waves to Seismic Waves. In: *Reflection Seismology*. Elsevier. 2014. pp. 47–81. DOI: 10.1016/B978-0-12-409538-0.00003-8.
28. Zhang Y., Wang T., Bian Y., Yang Q. Features of different types of seismic events in China's Capital Region. *Earthquake Science*. 2021. Vol. 34. No. 6. pp. 489–506. DOI: 10.29382/eqs-2021-0035.
29. Zhang Z.-X. Stress Waves. In: *Rock Fracture and Blasting*. Elsevier. 2016. pp. 1–36. DOI: 10.1016/B978-0-12-802688-5.00001-4.

DOI: 10.46698/VNC.2026.11.67.001

Original paper

Study of the activity dynamics of the Otman-Bozdag mud volcano

G.J. Yetirmishli^{ORCID}, S.E. Kazimova^{ORCID}

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

Received: 21.11.2025, revised: 16.03.2026, accepted: 19.03.2026

Abstract: Relevance. Otman-Bozdag is one of the most active and potentially hazardous mud volcanoes of the Absheron Peninsula, capable of producing large-scale emissions of breccia, gases, and thermal energy. Until recently, the absence of continuous seismic monitoring limited detailed analysis of subsurface processes and eruption dynamics. The installation of a modern digital seismic network in 2022 within an international project enabled real-time monitoring of mud volcanic activity. **Aim.** This study aims to investigate the seismic and geodynamic features of the Otman-Bozdag mud volcano, identify stages of its activity, and assess its connection with deep tectonic structures of the South Caspian Basin. **Methods.** The study is based on historical eruption data and continuous seismic records from 35 Kinometrics and 12 Nanometrics stations. Seismic monitoring was conducted using SeisComp5 to detect local seismicity, identify P- and S-waves, estimate source depth, timing, and energy parameters. Stress regime variations were analyzed using the Lode–Nadai coefficient, complemented by satellite-based mapping of breccia redistribution. **Results.** The results indicate that the Otman-Bozdag mud volcano operates as a multi-level fluid discharge system controlled by deep-seated faults of the South Caspian Basin. Variations in the Lode–Nadai coefficient reflect transitions from stable to unstable stress states, coinciding with periods of volcanic activation. Seismic data allow precise determination of eruption onset, source depth, duration of individual stages, and total released energy.

Keywords: mud volcano, Otman-Bozdag, seismic monitoring, Nanometrics, breccia, fluid dynamics, Lode–Nadai coefficient.

For citation: Yetirmishli G.J., Kazimova S.E. Study of the activity dynamics of the Otman-Bozdag mud volcano. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 109-120. DOI: 10.46698/VNC.2026.11.67.001

УДК 551.435.2

DOI: 10.46698/VNC.2026.11.67.001

Оригинальная статья

Исследование динамики активности грязевого вулкана Отман-Боздаг

Г.Дж. Етирмишли^{ORCID}, С.Э. Казимова^{ORCID}

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

Статья поступила: 21.11.2025, доработана: 16.03.2026, принята к публикации: 19.03.2026

Резюме: Актуальность работы. Отман-Боздаг – один из наиболее активных и потенциально опасных грязевых вулканов Апшеронского полуострова, способный производить масштабные выбросы брекчии, газов и тепловой энергии. До недавнего времени отсутствие непрерывного сейсмического мониторинга ограничивало детальный анализ подземных процессов и динамики извержений. Установка современной цифровой сейсмической сети в 2022 году в рамках международного проекта позволила осуществлять мониторинг грязевой вулканической активности в режиме реального времени. **Целью** данного исследования является изучение сейсмических и геодинамических особенностей грязевого вулкана Отман-Боздаг, выявление стадий его активности и оценка его связи с глубинными тектоническими структурами Южно-Каспийского бассейна. **Методика исследования** основана на исторических данных об извержениях и непрерывных сейсмических записях с 35 станций Kinometrics и 12 станций Nanometrics. Сейсмический мониторинг проводился с использованием SeisComP5 для обнаружения локальной сейсмичности, идентификации Р- и S-волн, оценки глубины очага, времени возникновения и энергетических параметров. Вариации режима напряжений анализировались с использованием коэффициента Лоде–Надаи, дополненного спутниковым картированием перераспределения брекчии. **Результаты** показывают, что грязевой вулкан Отман-Боздаг функционирует как многоуровневая система разгрузки флюидов, контролируемая глубинными разломами Южно-Каспийского бассейна. Вариации коэффициента Лоде–Надаи отражают переходы от стабильных к нестабильным состояниям напряжений, совпадающие с периодами вулканической активности. Сейсмические данные позволяют точно определить начало извержения, глубину очага, продолжительность отдельных стадий и общую высвобожденную энергию.

Ключевые слова: грязевой вулкан, Отман-Боздаг, сейсмический мониторинг, Nanometrics, брекчия, флюидодинамика, коэффициент Лоде–Надаи.

Для цитирования: Етирмишли Г.Дж., Казимова С.Э. Исследование динамики активности грязевого вулкана Отман-Боздаг. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 109–120. DOI: 10.46698/VNC.2026.11.67.001

Introduction

Azerbaijan is one of the world's unique and exemplary regions for the development of mud volcanism. Of the approximately 2,500 mud volcanoes known on the planet, more than 350 are located on the land of Eastern Azerbaijan and in the adjacent Caspian Sea area (Fig. 1). All main types of mud-volcanic manifestations are represented here – active, extinct, buried, submarine, island, as well as sites with intense hydrocarbon seepage. The annual activity of mud volcanoes in the country ranges from 3–5 to 10 or more eruptions during years of heightened seismic activity, averaging 7–12 events per year. Over the past two centuries—since 1810—and during the last 25 years of monitoring on 94 volcanoes, a total of 443 eruptions have been recorded [Rahmanov, 1987; Aliyev et al., 2009; Ustyugov, Ershov,

2019]. Most of these episodes were synchronized with earthquakes which, considering their magnitude, hypocentral depth, and distance to the volcano, often acted as a “trigger mechanism” for the activation of mud-volcanic processes.

Studies of the geochemical and mineralogical characteristics of sedimentary rocks in Eastern Azerbaijan demonstrate the important role of geochemical indicators in reconstructing sedimentation conditions and identifying the sources of terrigenous material. The analysis of mud volcano breccias carried out in the study by [Baloglanov, 2023] revealed regular patterns in the distribution of chemical elements and their relationship with sedimentation processes and deep sources of material. Geological and geochemical investigations of mud volcano breccias in the eastern part of the region also show that their composition reflects the structural features of the sedimentary cover and the tectonic activity of oil- and gas-bearing structures [Baloglanov, Babayev, 2023]. Additional data on mineralogical and geochemical proxies of Miocene sediments indicate the complex origin of the sedimentary material and suggest a relationship between the sources and various lithological complexes, which is important for interpreting the formation conditions of hydrocarbon-bearing basins in Eastern Azerbaijan [Yolchuyeva et al., 2025].

However, an eruption occurs only when the volcano itself is in a state of energetic readiness to release [Aliyev, Bayramov, 2008; Ahmedbeyli, 1975]. Of particular interest is the high concentration of active volcanoes with regular eruptions. Among them are the widely known Lokbatan (29 eruptions) and Keyreki (19) on the Absheron Peninsula, Shikhzarly (26) in Gobustan, Gushchu (15) in the Shamakhi district, and Khare-Zirya (13) in the northern part of the Baku archipelago [Aliyev, Yetirmishli, 2021]. Each mud-volcano eruption provides new information, a “message” about the processes occurring in the subsurface. Unfortunately, due to the short duration of mud-volcanic eruptions, it is almost never possible to observe and follow the entire mechanism from start to finish. Usually, geologists learn about it with some delay, and in the case of remote volcanoes, observations occur after the eruption has ended. How the process unfolds is often recorded mainly from eyewitness accounts.

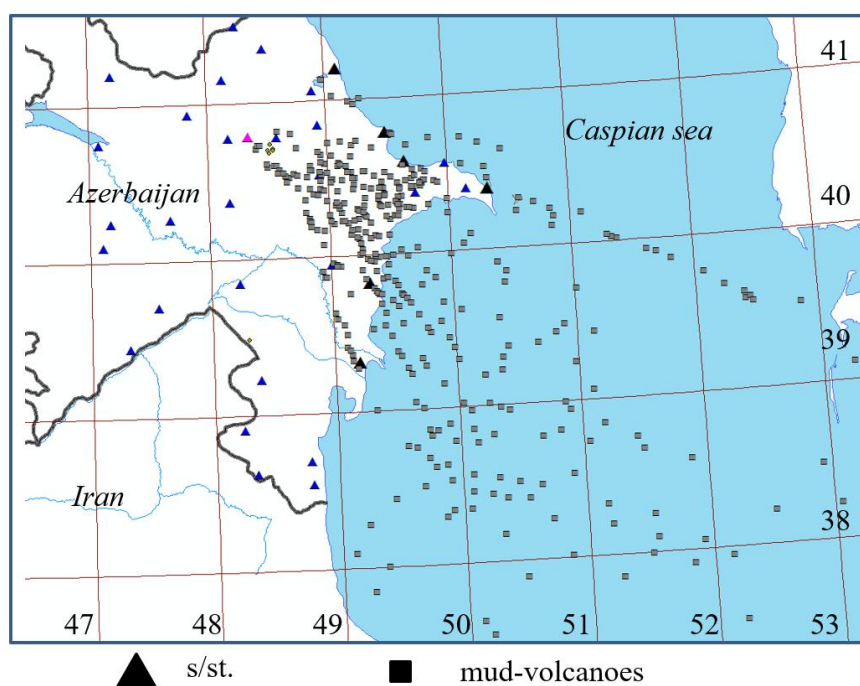


Fig. 1. Diagram of the distribution of mud volcanoes in Azerbaijan and the southern Caspian region

Thanks to the high-resolution capabilities of digital seismic equipment produced by Kinometrics (USA), the Republican Center of the Seismic Service under ANAS has been able since 2003 to record and analyze mud-volcano eruptions, determining the time and duration, number of phases, hypocentral depth (vent), and eruption energy [Kazimova et al., 2016]. In 2022, within the framework of an international project, the Republican Center installed an additional 22 Nanometrics seismic stations (Canada) in Azerbaijan. For the first time in the world, 12 of these stations were deployed in the Absheron and Gobustan regions to study mud-volcano dynamics, and a dedicated monitoring group was established to track mud-volcanic activity.

The installation of high-sensitivity seismometers and GPS stations near mud volcanoes allows for monitoring microseismic activity and crustal deformations before and after eruptions. Such networks help identify correlations between volcanic eruptions and tectonic shocks. For example, analysis of digital records from volcanic stations several hours before the Lokbatan mud-volcano eruption on 11 August 2022 showed that the eruption did not occur instantaneously, but rather involved a preparatory phase [Yetirmishli, Kazimova, 2023]. Thus, the activation of the mud volcano started several hours prior to the eruption.

Given the high concentration and diversity of mud-volcanic manifestations, particular interest is focused on the Otman-Bozdag volcano, which is one of the most dynamic and well-studied mud-volcanic structures of Southern Absheron. Its activity, including major historical and recent eruptions, makes it a representative model for analyzing mud-volcanism mechanisms, highlighting the relevance of the present study.

Research Methodology

As noted above, in 2022, within the framework of an international project, the network of high-precision digital seismic stations in Azerbaijan was significantly expanded. The Republican Center of the Seismic Service installed an additional 22 Nanometrics stations (Canada), enhancing both the sensitivity of detection and the accuracy of localizing seismic events of various origins. A distinctive feature of the project was the first-ever deployment worldwide of a specialized system for studying mud-volcano dynamics: 12 stations were installed in the Absheron and Gobustan regions, where the highest concentration of active mud volcanoes is observed.

These stations formed a unified local network aimed at detailed monitoring of mud-volcanic activity. Data processing and analysis are performed using the SeisComp5 software package, adapted for real-time monitoring and automatic event classification. The system algorithms allow for the detection of anomalous signals characteristic of mud volcanoes, which differ from tectonic earthquakes in spectrum, amplitude-time structure, and duration.

The data-processing methodology consists of several sequential stages. At the first stage, events are automatically detected, and the first arrivals of P- and S-waves are identified. Then, hypocentral parameters are refined: the coordinates and approximate location of the mud-volcano vent are determined using data from nearby stations with minimal error. For each event, the exact eruption onset time and duration are recorded, which is particularly important for studying eruption dynamics and energy release.

The next stage involves analysis of seismic signal shapes, spectral content, and phase structure. The number of phases, signal energy, and temporal characteristics are used to classify eruption types and assess the magnitude of the process. Event energy is additionally calculated, allowing comparisons between eruptions and identification of temporal trends.

To understand the formation mechanism of mud eruptions and assess potential volcanic activity, we analyzed the evolution of the stress state around the volcano using the Lode–

Nadai parameter. In seismology, this parameter is applied when reconstructing the stress tensor from focal mechanism data. The Lode–Nadai parameter ($\mu\sigma$) characterizes the type of stress state, reflecting the relationship between the three principal deviatoric stresses at a fixed maximum shear stress [Babayev et al., 2019]. Since the calculations exclude the spherical component of the tensor, the parameter characterizes only the deviatoric state associated with material deformation. Its value is defined as $\mu\sigma = (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$, ranging from -1 to $+1$. $\mu\sigma = +1$ corresponds to a near-biaxial tension state ($\sigma_2 \approx \sigma_1$), $\mu\sigma = -1$ corresponds to biaxial compression ($\sigma_2 \approx \sigma_3$), and $\mu\sigma = 0$ corresponds to pure shear. In the international literature, the related parameter $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ is often used, which is connected to the Lode–Nadai parameter by $\mu\sigma = 1 - 2\Phi$.

Mud Volcano Otman-Bozdag

The Otman-Bozdag mud volcano is located 60 km from Baku, between the villages of Sangachal and Gobustan, and approximately 5 km west of the Karadag station of the Azerbaijan Railway. It represents one of the most characteristic and well-studied features of the Absheron mud-volcanic province. Morphologically, the volcano has the shape of a truncated cone, typical for ancient and repeatedly reactivated mud-volcanic edifices. The absolute height of the crater exceeds 400 m above sea level, emphasizing the substantial scale of the volcanic structure (Fig. 2). The steep slopes of the volcano are dissected by a system of radially diverging small erosion gullies, reflecting both the prolonged influence of surface runoff and the lithological composition of erupted materials [Golubyatnikov, 1913; Yakubov, 1976].

The crater shape of Otman-Bozdag is a representative example of a mud-volcanic caldera. It is characterized by steep and high inner walls formed due to repeated collapse phases and subsidence of the central part following degassing and fluid outflow. The central area of the crater is lowered, consistent with models of subsidence of mud-volcano chamber roofs. Seven concentric ledges are observed on the crater floor, reflecting the staged evolution of crater morphology and likely associated with alternating periods of activity and relative quiescence [Suleymanov, Pashaly, 1953].

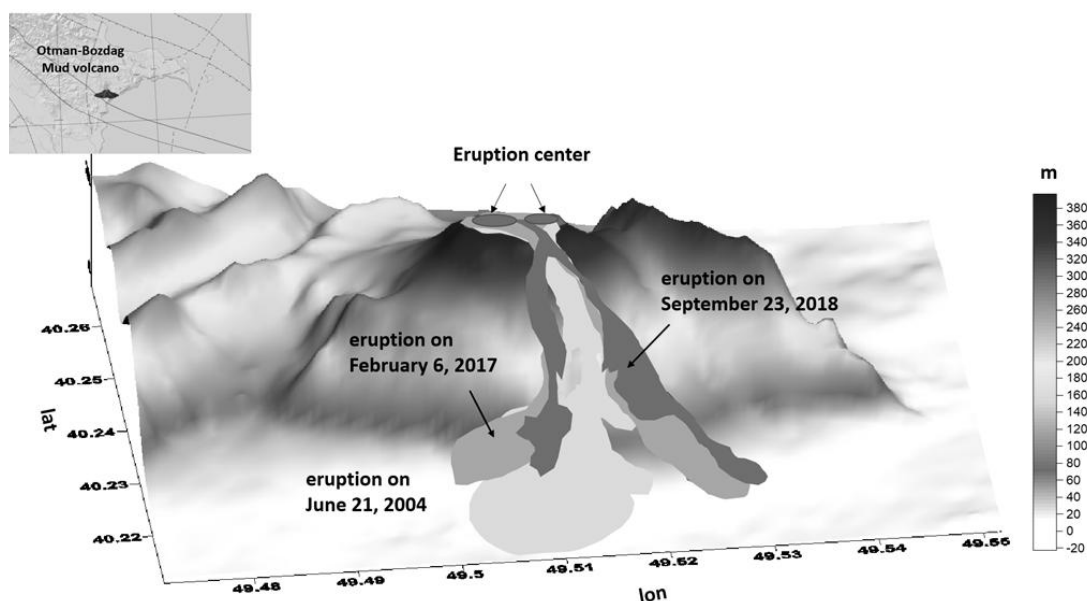


Fig. 2. Topographic model of the Otman-Bozdag mud volcano

The crater, measuring approximately 500×400 m, is partially filled with mud-volcanic breccias and clayey masses on the side of the stream channel, while its opposite part is overlain by hill deposits. On the crater surface, a cluster of closely spaced mud cones is localized-active point-like vents that periodically erupt liquid mud, formation waters, and gas. Although the gas volumes are small, their constancy indicates ongoing migration of deep fluids and confirms that the volcano remains active [Yakubov, 1976]. The area of the cone cluster reaches approximately 60 m, reflecting the compactness of the active central vent.

During intense mud-volcano eruptions, breccia ejections form powerful fan-shaped or tongue-shaped flows, which can extend hundreds of meters in width and more than a kilometer in length. The thickness of such flows typically reaches 10–12 m, and in some cases exceeds these values. These deposits often cover significant areas, as observed at the Inchabel and Dashmardan volcanoes, where breccia coverage reaches 37.7 and 31.9 km², respectively, with an average thickness of about 100 m. The figure shows tongue-shaped breccia flows of the Otman-Bozdag volcano in 2004, 2017, and 2018.

The eruption products consist of clayey mass containing fragments of rocks of various ages. Breccia from the cones includes materials from the productive layer, diatomite deposits, as well as older stratigraphic horizons, confirming the involvement of deep fluid-retentive complexes in eruption formation. The uplift of these rocks to the surface reflects the activity of vertical fault-fracture zones, along which degassing and pressure release occur.

To the west, north, and east, Otman-Bozdag is bordered by Absheron limestones, as well as inclined limestones containing mollusk shells. These formations dip toward the volcano, consistent with regional folding patterns and indicating the presence of favorable structural traps for fluid migration.

Some studies suggest that the volcano is formed within a synclinal structure, as similar forms are observed at other regional volcanoes. However, geological data from the surrounding area, including the orientation of sedimentary layers and main structural elements, indicate that Otman-Bozdag is associated with anticlinal uplifts. Its central vent aligns with the axis of the Karadag anticline and lies within its tectonically disrupted zone, reflecting a direct link between mud-volcanic activity and fault-controlled pathways for deep fluid release [Yusubov et al., 2019].

No surface oil manifestations are observed within the volcanic area. However, subsurface layers indicate continued directed migration of hydrocarbon fluids, suggesting ongoing deep fluid migration. The proximity of the Karadag oil field confirms the potential involvement of regional hydrocarbon-bearing horizons in the volcano's fluid supply.

Despite the absence of surface oil emissions, considering the significant hydrocarbon reserves in the lower parts of the productive layer in neighboring areas of the Gabristan zone and the favorable local geological conditions, the presence of oil-bearing horizons within the studied valley is likely. This underscores the need for further geological and geophysical studies aimed at clarifying fluid migration pathways, the depth of feeding channels, and the role of regional tectonics in sustaining volcanic activity.

Chronology of Eruptions of the Otman-Bozdag Mud Volcano

The Otman-Bozdag mud volcano has repeatedly demonstrated powerful activity over the past two centuries. The first documented eruption occurred on February 3, 1854, when the explosion ejected breccia up to 20 meters high, forming a deposit covering approximately 1,000 hectares with a thickness of up to 2 meters and a total volume of about

20 million cubic meters. In the evening of November 23, 1904, a strong explosive eruption was observed, accompanied by gas release and a flame reaching 100 meters. The eruption occurred in three phases; the crater was cut by cracks up to 1.2 km long and 0.7 m wide, while the breccia flow extended 3 km in length and 1.75 km in width, covering an area of 250 hectares [Golubyatnikov, 1913].

On January 31, 1922, at 18:25, an eruption lasting 25 minutes occurred, producing a flash and a cloud of black smoke. The flame reached over 500 meters, but the emission of new breccia was minimal: most of the mass movement resulted from cracking of old flows and their displacement from the crater center to the periphery. In the autumn of 1951, the breccia cover occupied an area of about 7 hectares, with thickness varying from 0.5–1 meter at the periphery to 4–5 meters in the center, giving a total volume of 182,000 cubic meters. Linear cracks with amplitudes of 1–2 meters were recorded in the crater zone, and scattered eruption products on the surface indicated local combustion [Kovalevsky, 1922].

On October 1, 1965, at 12:50, an eruption lasted 2.5 hours, accompanied by underground rumbling, explosions, and emission of gas and breccia [Kerimov et al., 1966; Buniat-Zade, Gorin, 1974]. Flames exceeded 100 meters, forming a mushroom-shaped cloud of white smoke. The breccia deposit, 220 meters in diameter, covered 4 hectares with a thickness of 1–2 meters and a total volume of 52,500 cubic meters. Concentric and radial cracks up to 600 meters long, 3 meters deep, and 0.4–0.5 meters in displacement amplitude were observed.

In the spring of 1985, gas ignition and a breccia eruption with a thickness of 1 meter over 2 hectares (diameter ~160 meters) were observed. Fracturing zones formed within the crater, and one of the cracks reached 400 meters in length in the near-latitudinal direction. On December 12, 1994, at 17:45, a 40-minute eruption occurred, accompanied by gas ignition and formation of a breccia cover measuring 240×210 meters (5 hectares) with a thickness of 0.5–2 meters and a volume of 63,000 cubic meters. Three major cracks were recorded, each 450 meters long, over 3 meters deep, and 2 meters wide.

On June 21, 2004, in the evening, underground rumbling, explosions, and breccia ejection to a height of 20–25 meters were observed. The volume of breccia ejected by the volcano was 52 m^3 with a thickness of 0.4–1.8 meters, covering an area of 4.3 hectares within a crater field measuring 240×195 meters.

On February 6, 2017, the Otman-Bozdag volcano erupted explosively in two stages. The first stage lasted 3 minutes 23 seconds with a source depth of 3 km, and the second stage lasted 5 minutes at the same depth. During the second stage, a fire column rose 270–300 meters above the crater. Deep cracks appeared near the crater. This was the 9th registered eruption of the Otman-Bozdag volcano, the previous one having occurred in 2004. During the survey, several deep cracks were discovered near the crater, some up to 6 meters wide and 4 km long. In addition to fire and smoke, the volcano emitted a large amount of mud, covering an area of 12 hectares. The eruption was recorded by 8 digital seismic stations: Gobu, Ali-Bayramly, Gobustan, Gala, Altyagach, Pirgulu, Siyazan, and Khinalyg.

On September 23, 2018, the volcano erupted again after a one-year pause. The first event occurred at approximately 08:53, and the second at 09:58. Flame heights reached 200–300 meters. Following the eruption, numerous cracks up to 40 meters deep formed in the surrounding area (Fig. 3).

On October 11, 2025, at 08:27 local time, another eruption of Otman-Bozdag occurred in the Karadag was district, was recorded in three phases. The first phase started at 08:27 and lasted 10 minutes, the second from 08:39 to 08:51 (12 minutes), and the third from 09:02 to 09:06 (4 minutes) (Fig. 4). The source depth reached 4 kilometers, and the total energy released was $2.19 \times 10^7 \text{ J}$. The eruption was accompanied by a fire column.

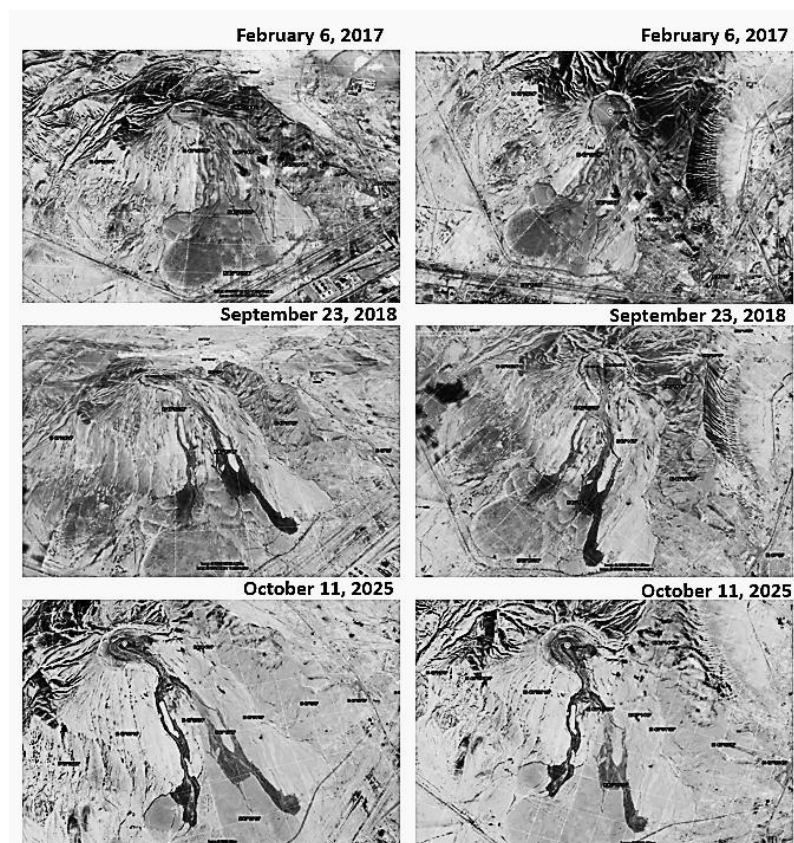


Fig. 3. Maps of mud-volcanic breccia flows of Otman-Bozdag in 2017, 2018, and 2025, constructed based on Google Earth Pro data

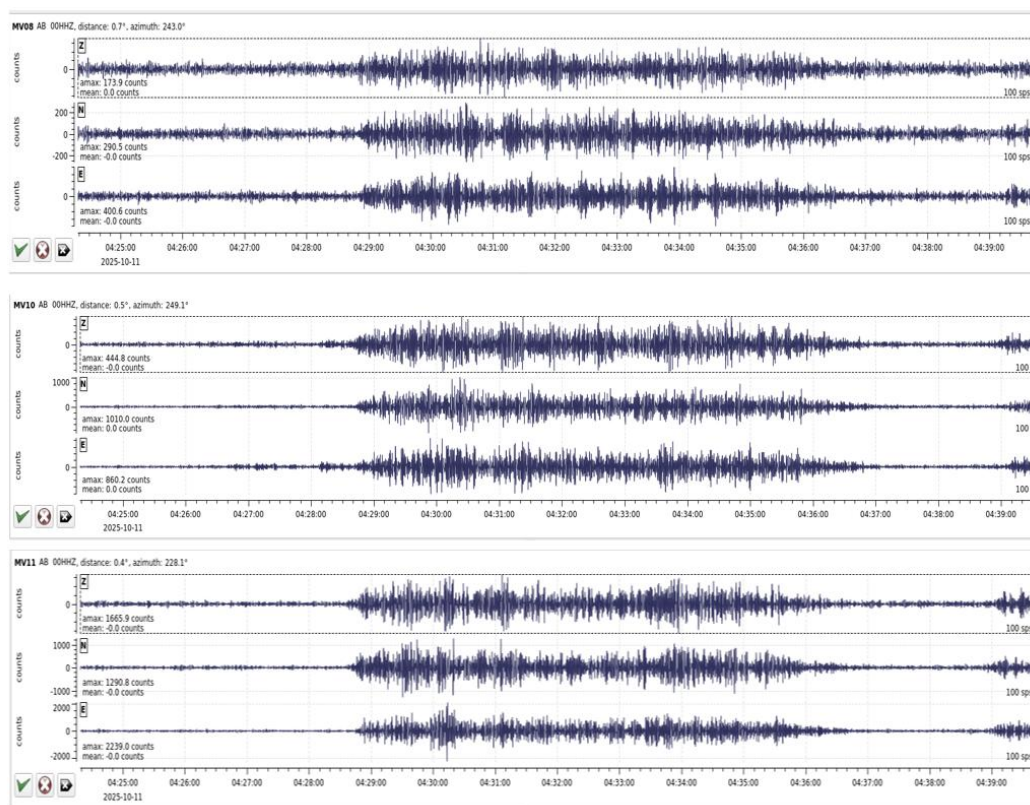


Fig. 4. Waveform record of the Otman-Bozdag mud volcano eruption in 2025

Throughout the 19th–20th centuries, similar volcanic activity was recorded on the nearby Gil Island, with eruptions observed in 1810, 1859, 1860, 1895, 1896, 1913, 1926, 1937, 1960, and 1962.

Analysis of Otman-Bozdag eruptions over the past 170 years shows pronounced irregular periodicity. Intervals between events range from 3–4 years to 30–40 years, indicating no regular cycle and a dependence on complex deep-fluid processes. The longest pause (33 years) occurred between the 1922 and 1951 eruptions, while the shortest—around 3 years—was recorded between 2017 and 2018, reflecting an overall increase in activity in the 21st century.

Comparison of normalized eruption intensity indicators—fountain height, deposit area, and breccia volume—highlights key events reflecting the volcano's evolving dynamics. The 1854 eruption stands out as an absolute extreme: its deposit, covering ~1000 ha with a breccia volume of ~20 million m³, far exceeds all subsequent events. The coincidence of maxima in area and volume underscores the exceptional power of this event on a geological scale.

In terms of gas emission and visual effects, the 1922 eruption is notable, producing a flaming column over 500 m—the highest recorded. Despite a relatively small new breccia volume, this event represents a phase of extreme degassing of deep fluids.

The second half of the 20th century shows a trend of reduced eruption scales; however, the 1965, 1985, and 1994 events still exhibited marked fracturing, underground rumbling, and intense gas release. Although integrated parameters decreased, the volcano retained high structural mobility, indicating continued activity of the feeding system.

In the 21st century, a new phase of enhanced dynamics is observed. The 2004 eruption, though small (~52 m³), exhibited significant seismoacoustic expression. The most intense modern events occurred in 2017, 2018, and 2025, reflecting a trend toward more frequent and stronger eruptions.

Spatial-temporal variations of the Lode–Nadai coefficient in the Otman-Bozdag mud volcano region (2004–2025)

The maps presented illustrate the spatial-temporal variations of the Lode–Nadai coefficient in the Otman-Bozdag mud volcano region for 2004, 2017, 2018, and 2025 (Fig. 5). The coefficient values reflect changes in the type of deviatoric stress state, ranging from dominant extension (negative values, cool tones) to predominant compression (positive values, warm tones).

In 2004, the area around the volcano was characterized by a pronounced dominance of extensional stresses, manifested as a large zone of negative μ_s values to the south and southwest of the volcano. By 2017, the stress field had redistributed: local compression zones formed to the north and northeast of Otman-Bozdag, possibly indicating a shift in the local tectonic regime or a response to recent seismodynamic processes.

In 2018, the stress field showed further strengthening of areas with positive coefficient values, especially in the northern part of the region, while the zone of negative values persisted in the south but had shifted. This reflects a transition from a predominantly extensional stress regime to a mixed or even compressional type in certain areas.

By 2025, negative coefficient values again dominated the central and southern parts of the region, yet new local compression zones appeared, demonstrating the high temporal variability of the deviatoric stress field in the area.

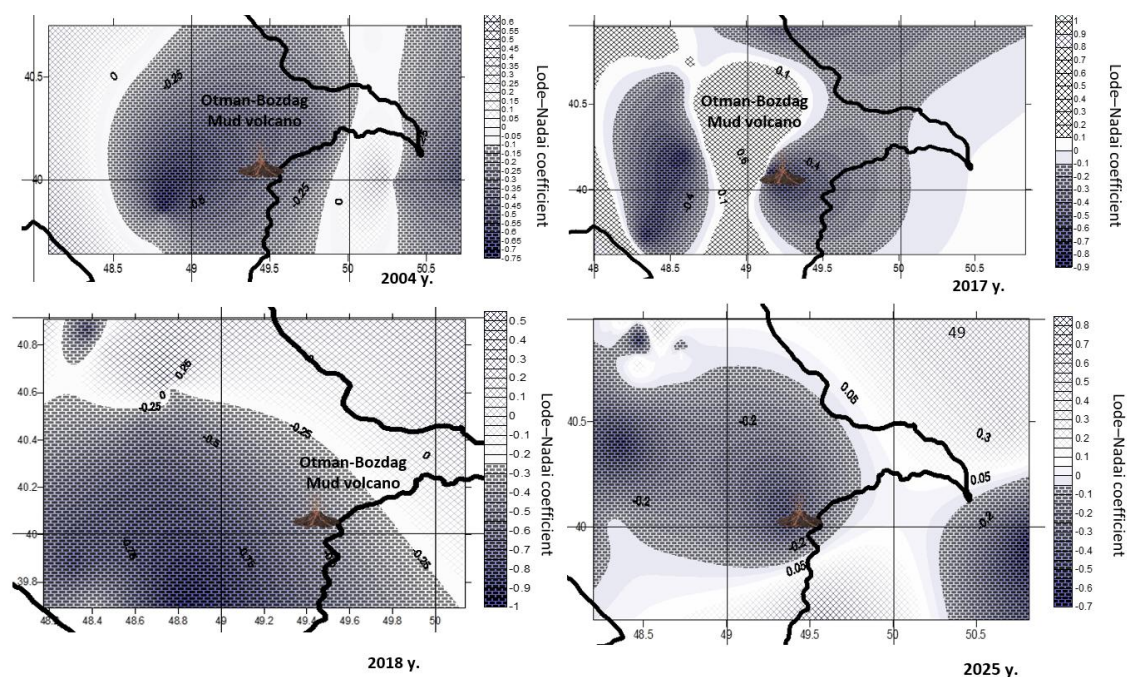


Fig. 5. Evolution of the Lode–Nadai coefficient field around the Otman-Bozdag mud volcano for 2004, 2017, 2018, and 2025

The observed variations of the Lode–Nadai coefficient indicate a highly dynamic local stress regime around the mud volcano. The redistribution of deviatoric stresses may be linked both to regional tectonic processes and to periods of volcanic activation, changes in pore pressure, or local responses of the sedimentary cover to deep geodynamic processes.

Discussion of Results

The Azerbaijani mud-volcanic province, with the world's largest concentration of active and diverse mud volcanoes, represents a unique natural laboratory for studying deep fluid-dynamic processes. The high frequency of eruptions, coupled with their close relationship to regional seismicity, provides exceptional observational opportunities [Yunuslu, 2024; Ivanov et al., 2019; Etiope, Milkov, 2004; Wright, Burgess, 1992; Svensen et al., 2009].

The deployment of high-sensitivity digital seismic stations (Kinometrics and Nanometrics), along with the creation of the world's first specialized mud-volcano monitoring network, has enabled the detailed analysis of eruption preparation and development dynamics. The data confirm that mud-volcanic processes exhibit a pre-activation phase lasting from several minutes to a few hours.

Morphological features of the Otman-Bozdag mud volcano—including its well-developed caldera, concentric terraces, and radial fracture system—clearly indicate multiple phases of activity, accompanied by repeated cycles of degassing, collapse, and deep fluid discharge.

Geological and structural evidence shows that Otman-Bozdag formed not within a synclinal depression, as previously thought, but along an anticlinal uplift of the Karadag structure, intersected by deep faults. This confirms the direct link between mud-volcanism and tectonic channels of reservoir pressure release.

The chemical and lithological composition of breccias, containing fragments of stratigraphic complexes of various ages—from the productive layer to diatomite and older horizons—indicates the involvement of a multi-level system of impermeable layers and deep fluid reservoirs in eruption formation.

The chronology of Otman-Bozdag eruptions over the past 170 years demonstrates the cyclicity and periodicity of volcanic activity, including both major explosive and relatively minor events. Eruption energetics, ejecta volumes, and fracture parameters vary significantly, reflecting the dynamic pressure regime in the feeding system.

Analysis of the Lode–Nadai coefficient shows that an inhomogeneous deviatoric stress state develops around the volcano, changing over time and correlating with eruption periods. This parameter can therefore serve as an additional indicator of mud-volcanic pre-activation.

The spatial association of the volcano with hydrocarbon migration zones and the proximity of oil and gas-bearing horizons in the Karadag area suggest a possible role of hydrocarbon fluids in feeding the system, highlighting the need for further deep geophysical studies.

This study confirms that Otman-Bozdag serves as a representative natural model of the mud-volcanic process in Southern Absheron. Its comprehensive investigation—including seismic monitoring, morphometric analysis, geological mapping, and stress-field assessment—significantly advances the understanding of mud-volcano formation mechanisms and evolution in Azerbaijan.

Conclusion

The Azerbaijani mud-volcanic province represents a unique natural laboratory for studying deep fluid-dynamic processes. Its high eruption frequency and strong connection to regional seismicity make it an invaluable observational site. The use of digital seismic stations (Kinometrics and Nanometrics) enabled, for the first time, detailed analysis of eruption preparation and development, revealing pre-activation phases lasting from several minutes to a few hours.

Eruptions of Otman-Bozdag depend on the stress–strain state of the crust and the volcano’s energetic readiness, highlighting the nonlinear interaction between tectonics and the fluid system. The volcano’s morphology and the composition of breccias indicate multiple cycles of degassing and the involvement of multi-level fluid reservoirs.

Geological and structural data confirm the volcano’s connection to deep faults of the Karadag structure, while analysis of the Lode–Nadai coefficient shows a correlation between deviatoric stress and periods of volcanic activity. The spatial association with oil and gas-bearing zones suggests a possible role of hydrocarbon fluids in the feeding system.

Otman-Bozdag serves as a representative model of the mud-volcanic process in Southern Absheron, and its comprehensive study significantly enhances the understanding of the mechanisms governing the formation and evolution of mud volcanoes in Azerbaijan.

References

1. Ahmedbeyli F.S. Modern activity of mud volcanoes in eastern Azerbaijan and its relation to seismicity. Proceedings of the Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR. 1975. Vol. 31. No. 8. pp. 61–64. (In Russ.)
2. Aliyev Ad.A., Bayramov A.A. Influence of seismicity on mud volcanism of Azerbaijan and some paradoxes. Proceedings of the Institute of Geology of Azerbaijan National Academy of Sciences. No. 35. Baku. Nafta-Press. 2008. pp. 40–51. (In Russ.)
3. Aliyev Ad.A., Guliyev I.S., Rahmanov R.R. Catalogue of Mud Volcano Eruptions of Azerbaijan (1810–2007). Baku. Nafta-Press. 2009. 110 p. (In Russ.)
4. Aliyev Ad.A., Yetirmishli G.D. New data on mud volcano eruptions in Azerbaijan. Geology and Geophysics of the Russian South. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 22–35. DOI: 10.46698/VNS.2021.34.18.002. (In Russ.)
5. Babayev G., Yetirmishli G., Kadirov F., Kazimova S.E., Telesca L. Stress field pattern in the northeastern part of Azerbaijan. Pure and Applied Geophysics. 2019. Vol. 177. Issue 462. pp.

2739–2751.

6. Baloglanov E.E. Geochemical proxies of the gryphon breccia of mud volcanoes in East Azerbaijan: regularities in the distribution of chemical elements and spatial characteristics of sedimentation. In: Series "Geology. Geography. Ecology". 2023. Issue 59. pp. 1–17.

7. Baloglanov E.E., Babaev E.E. Geological and geochemical study of mud volcano breccia in eastern Azerbaijan. *Journal of Young Researchers*. 2023. No. 1. pp. 66–74.

8. Buniat-Zade Z.A., Gorin V.A. The gas-oil mud volcano Otman-Bozdag and its position in the fault dislocation of the western flank of the South Caspian Basin. In: *Materials on the Geology of Oil and Gas of Azerbaijan*. Baku. Elm. 1974. pp. 89–99. (In Russ.)

9. Etiope G., Milkov A.V. A new estimate of global methane flux from onshore and shallow submarine mud volcanoes to the atmosphere. *Environmental Geology*. 2004. Vol. 46. pp. 997–1002. DOI: 10.1007/s00254-004-1075-2.

10. Golubyatnikov D.V. Review presented at the Geological Committee on the geological structure of the area near Mount Otman-Bozdag. *Proceedings of the Geological Committee*. 1913. Vol. 31. No. 10. pp. 369–371. (In Russ.)

11. Ivanov V., Popov A., Mamedov R. Mud volcano growth by radial expansion: Examples from onshore Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*. 2019. Vol. 105. pp. 32–47. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2019.03.005.

12. Kazimova S.E., Huseynov A.R., Rashidov T.M., Khasayeva A.B. Definition of mud volcano eruption sources based on digital seismic station records. *Reports*. 2016. No. 3. pp. 59–62.

13. Kerimov A.A., Khalilov E.A., Razzhivina L.A. Eruption of the Otman-Bozdag mud volcano. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Oil and Gas*. 1966. No. 4. pp. 18–20. (In Russ.)

14. Kovalevsky S.A. Eruption of the Otman-Boz-Dag mud volcano. *Academy of National Economy Bulletin*. 1922. No. 2. pp. 35–36. (In Russ.)

15. Rahmanov R.R. *Mud Volcanoes and Their Significance in Forecasting Oil and Gas Potential*. Moscow. Nauka. 1987. 174 p. (In Russ.)

16. Suleymanov D.M., Pashaly N.V. Geological and petrographic characteristics of the Otman-Bozdag mud volcano. *Reports of the Academy of Sciences of Azerbaijan*. 1953. Vol. 9. No. 1. pp. 31–36. (In Russ.)

17. Svensen H., Planke S., Polteau S. Release of methane from a volcanic basin as a mechanism for initial Eocene global warming. *Nature*. 2009. Vol. 429. pp. 542–545. DOI: 10.1038/nature02577.

18. Ustyugov G.V., Ershov V.V. Eruptions of mud volcanoes in Azerbaijan and their correlation with strong earthquakes. *Bulletin of Voronezh State University. Series: Geology*. 2019. No. 4. pp. 6–13. (In Russ.)

19. Wright J.C., Burgess P.M. Morphology and evolution of mud volcanoes. *AAPG Bulletin*. 1992. Vol. 76. No. 5. pp. 729–737. DOI: 10.1306/2F91824F-1714-11D7-8645000102C1865D.

20. Yakubov A.A. *Mud Volcanoes of Azerbaijan*. Baku. Elm. 1976. 216 p. (In Russ.)

21. Yetirmishli G.J., Kazimova S.E. Eruption of the mud volcano "Lokbatan". *Geology and Geophysics of the Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 23–33. DOI: 10.46698/VNS.2023.14.41.002. (In Russ.)

22. Yolchuyeva U., Baloglanov E.E., Akhundov R., Samedov E., Mustafayev K. Mineralogical and geochemical proxies of Miocene sediments of Eastern Azerbaijan: Provenance and oil-bearing. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series: Geology. Geography. Ecology*. 2025. No. 62. pp. 11–24. DOI: 10.26565/2410-7360-2025-62-01.

23. Yunuslu T.A. Ecological characteristics of a series of mud volcanoes included in the Mud Volcano Group State Nature Reserve. *Baku State University Journal of Earth Sciences & Environment*. 2024. Vol. 1. No. 3. pp. 55–60. DOI: 10.30546/209805.2024.1.78.

24. Yusubov N.P., Alizade G.M., Rajabli J. Mud volcanism and hydrocarbon migration. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2019. No. 8(332). pp. 14–19. (In Russ.)

DOI: 10.46698/VNC.2026.65.49.001

Original article

Detailed geological and tectonic study of the Khara-Zira structure and surrounding territories of South Caspian Basin based on seismic-velocity models

E.Y. Abbasov^{1,2}, A.B. Hasanov^{2,3}, G.O. Veliyev⁴, Z.C. Axundov¹¹ The State Oil Company of the Republic of Azerbaijan (SOCAR),

121 G. Aliev Ave., Baku AZ 1010, Azerbaijan, e-mail: zaur.axundov@socar.az;

² Azerbaijan State Oil and Industry University, 20 Azadlig Ave., Baku AZ 1029, Azerbaijan, e-mail: elmaddin.y.abbasov@socar.az, abbasovmeddin530@gmail.com;³ Oil and Gas Institute, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, 9 F. Amirov Str., Baku AZ 1000, Azerbaijan, e-mail: adalathasanov@yahoo.com;⁴ Baku State University, 33 Z. Khalilov Str., Baku AZ 1148, Azerbaijan, e-mail: humbat2007@mail.ru

Received: 23.12.2025, revised: 02.03.2026, accepted: 06.03.2026

Abstract: A comprehensive analysis of the seismic conditions, tectonic structure, and hydrocarbon potential of the Khara-Zira, Sangachal-Deniz, and Duvanny-Deniz structural zones in the southwestern sector of the Caspian Sea remains a significant geological challenge. This assessment, based on modern geophysical data, is essential for improving the understanding of the region's structural framework and resource potential. **The aim** of the study was to investigate the geodynamic characteristics, morphological structure of sedimentary complexes, and the hydrocarbon potential of above named structural zones. **Research methods** included analyzing new data obtained using seismic logging, vertical seismic profiling (SL-VSP), and the common depth point (CDP) methods. Mapping of the main structures – Khara-Zira, Duvanny-Deniz, and Sangachal-Deniz – based on 2D seismic data and numerous seismic profiles covering the study area. Tectonic deformations and fault systems complicating these structures were also analyzed, taking into account the location, trajectory, and amplitude of longitudinal and transverse faults. These data allowed us to assess the influence of tectonics on the geodynamic evolution of the region. **Results.** Based on seismic velocity parameters, averaged vertical traveltime curves (hodographs) were constructed, which were used as a reliable basis for converting dynamic time dependency into depth sections. Furthermore, the morphological features of the Productive Suits and deeper sedimentary complexes were refined, including the contours of synclinal and periclinal zones, strike zones of tectonic faults, and the geological characteristics of structural elements. It was shown that a reliable interpretation of the structural-tectonic setting and velocity models provides a trustable basis for hydrocarbon exploration in these areas. Summarizing the obtained results, the final conclusion is that the hydrocarbon potential of the productive series and deeper layers is estimated to be considerable.

Keywords: seismic logging, vertical hodograph, seismic velocity model, fault.

For citation: Abbasov E.Y., Hasanov A.B., Veliyev G.O., Axundov Z.C. Detailed geological and tectonic study of the Khara-Zira structure and surrounding territories of South Caspian Basin based on seismic-velocity models. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 121-133. DOI: 10.46698/VNC.2026.65.49.001

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2026.65.49.001

Оригинальная статья

Детальное геолого-тектоническое исследование и оценка структуры Хара-Зира и прилегающих территорий Южного Каспийского бассейна на основе сейсмо-скоростных моделей

Е.Ю. Аббасов^{1,2}, А.Б. Гасанов^{2,3}, Г.О. Велиев⁴, З.Д. Ахундов¹

¹ Государственная нефтяная компания Азербайджанской Республики (SOCAR), Республика Азербайджан, AZ 1010, г. Баку, пр. Г. Алиева, 121, e-mail: zaur.axundov@socar.az;

² Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Республика Азербайджан, AZ 1010, г. Баку, пр. Азадлыг, 20, e-mail: elmaddin.y.abbasov@socar.az, abbasovmeddin530@gmail.com;

³ Институт нефти и газа Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, Республика Азербайджан, AZ 1000, г. Баку, ул. Ф. Амирова, 9, e-mail: adalathasanov@yahoo.com;

⁴ Бакинский государственный университет, Республика Азербайджан, AZ 1148, г. Баку, ул. З. Халилова, 33, e-mail: humbat2007@mail.ru

Статья поступила: 23.12.2025, доработана: 02.03.2026, принята к публикации: 06.03.2026

Резюме: Комплексный анализ сейсмогеологических условий, тектонического строения и перспектив углеводородосодержания структурных зон Хара-Зира, Сангачалы-море и Дуванны-море, расположенных в юго-западном секторе Каспийского моря, проведенный на основе современных геофизических данных, остается одной из **актуальных** геологических задач. **Цель исследования** – изучение геодинамических характеристик, морфологической структуры осадочных комплексов и углеводородного потенциала рассматриваемых структурных зон. **Методы исследования.** Проанализированы новые данные, полученные с помощью сейсмокаротажа, вертикального сейсмического профилирования (SL–VSP) и метода общей глубинной точки (МОГТ). В основу картирования главных структур: Хара-Зира, Дуванны-море и Сангачалы-море были положены 2D сейсмические данные и многочисленные сейсмические профили, охватывающие исследуемую территорию. Также были проанализированы тектонические деформации и системы разломов, осложняющие эти структуры, с учетом местоположения, траектории и амплитуды продольных и поперечных тектонических разломов. Эти данные позволили оценить влияние тектоники на геодинамическую эволюцию района. **Результаты.** На основе параметров сейсмической скорости, были построены усредненные вертикальные годографы, которые использовались в качестве надежной основы для преобразования динамических временных разрезов в глубинные разрезы. Кроме того, были уточнены морфологические особенности Продуктивной Толщи и более глубоких осадочных комплексов, включая контуры синклинальных и периклинальных зон, зон простиражения тектонических разломов и геологические характеристики структурных элементов. Показано, что надежная интерпретация структурно-тектонической обстановки и скоростных моделей обеспечивает надежную основу для разведки углеводородов в этих районах. Таким образом, из всех описанных деталей можно сделать вывод о достаточно высоком углеводородном потенциале продуктивной толщи и подстилающих горизонтов.

Ключевые слова: сейсмический каротаж, вертикальный годограф, сейсмическая скоростная модель, разломы.

Для цитирования: Аббасов Е.Ю., Гасанов А.Б., Велиев Г.О., Ахундов З.Д. Детальное геолого-тектоническое исследование и оценка структуры Хара-Зира и прилегающих территорий Южного Каспийского бассейна на основе сейсмо-скоростных моделей. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 121-133. DOI: 10.46698/VNC.2026.65.49.001

Introduction

The study area is located in the southeastern extension of the Utelgi–Kanizadag–Khara-Zira anticlinal zone of the Sangachal-Sea uplift. This anticlinal zone is separated from the Kanizadag structure by a shallow saddle where sediments of the Akchagyl stage have accumulated. In the crest of the fold, sediments of the Productive Series (PS) are observed, while on the flanks and in the southeastern pericline, Akchagyl and Absheron sediments are present. Quaternary sediments overlie the distant northeastern flank of the structure [Abdullayev et al., 2024; Abbasov, 2004; Alizadeh et al., 2024].

An integrated comparative analysis of newly acquired geological and geophysical data, coupled with advanced structural modeling, provides substantial scientific and practical value. This approach facilitates the expansion of existing production areas, the identification of new oil- and gas-bearing prospects, and the delineation of productive zones within deeper stratigraphic intervals.

At present, conducting such research is considered a highly relevant and significant scientific direction.

The objective of this study is to construct velocity models based on seismic-logging and Vertical Seismic Profiling (VSP) data from wells drilled in the research area – Sangachal-Deniz-124, Sangachal-Deniz-440, Khara-Zira-568, and Well No. 578 of the 8 March field. The study also involves analyzing the results of VSP surveys conducted in these wells and refining the geological and tectonic structure of the area using data obtained from Common Depth Point (CDP) seismic exploration. Ultimately, the goal is to provide an accurate assessment of the hydrocarbon prospectivity of the studied structures.

The Sangachal-Deniz fold has an asymmetrical brachyanticlinal structure with a **north-west-southeast (NE–SE) trend within of South Caspean Basin (SCB)**. The structure is asymmetrical in both the transverse and longitudinal directions. The south-west (SW) flank of the fold (20–30°) is less inclined than the north-east (NE) flank (35–45°). The dip angles on the flanks decrease with depth, and in the VII horizon of the PL the dip angle of the layers decreases to 15–20°.

The Sangachal-Deniz brachyanticline, that was drilled here according to the data of the wells, is complicated by three main longitudinal faults (Report. Azerbaijan SSR, 1963–1964, SP 1/63, 2/63. Goberman, K. I.). These faults are traced stepwise and sequentially, where the northeastern block is lowered relative to the southwestern block. The amplitude of displacements along the tectonic fault varies between 100–200 m. As the depth increases, these faults approach each other and in the lower levels of the Productive layer (PL) sedimentary complex, in the upper part of the Miocene, they merge into a single fault [Alizadeh et al., 2024; Babeshko et al., 2025; Chernov et al., 2020; Ding et al., 2023].

The northeastern flank of the fold is divided into tectonic blocks by six transverse and two relatively small-scale longitudinal faults. The displacement amplitude between these blocks varies from 40–50 m to 100–200 m. The arch part of the fold and the southwestern flank are complicated by two main transverse faults. These faults separate the northwestern pericline of the fold from the main part, directing it from the northeast to the southwest (Study of sandy horizons and evaluation of oil and gas prospectivity in the Sangachal-sea – Babek uplift zone (including 8 March and Alet-sea fields) (Final Report. KMAIB. Baku. 2014. 494 p. / Guliyev Z.I., Shirinova S.A., et al.). As a result, the southeastern block has subsided relative to the northwestern block, each with an amplitude of 50–200 m. It is assumed that these transverse faults die out on the flanks before reaching the axis of the

synclines. The southeastern periclinal of the fold is twice as short as the northwestern periclinal [Chernov et al., 2020; Di Toro et al., 2011; Ding et al., 2023].

The short southeast periclinal, where the Sangachal-Deniz structure meets the Duvanni-Deniz structure, is also complicated by transverse tectonic faults. The Duvanni-Deniz uplift lies southeast of the Sangachal-Deniz uplift and is separated from it by a slight compression of the strata. The small saddle located between the structures is complicated by transverse faults [Yusubov, Guliyev, 2015; Di Toro et al., 2011; Babeshko et al., 2025]. Here the direction of the layers is partially inclined and the convex side is directed to the northeast. The axis of the Duvanni-Deniz fold turns southeast towards the Khara-Zira island.

Tectonically, the Duvanni uplift is an asymmetric anticlinal fold, the northeastern flank has a dip angle of 25–30°, and the southwestern flank has a dip angle of 20–25°. Thorough the seabed in the arch of the fold and in the northwestern periclinal PL sediments, and in the southeastern periclinal – upper Pliocene Quaternary sediments are observed. The southeastern periclinal extension is four times longer than the northwestern periclinal, and the structure dips towards the island of Khara-Zira (Report Marine Seismic Party, No. 23/84, No. 2/84. Baku, 1985/Алиева А.К.).

The arch part of the fold is complicated by longitudinal tectonic faults associated with Zambil Island, Khara-Zira Island and Abikh mud volcanoes. The central longitudinal fault in the Sangachal-Daniz uplift merges with the northern part of the Zambil Island uplift in the southeast, and is then followed by only two faults to the southeast. As a result of these faults, the central block has descended in the form of a graben (Report. Marine Seismic Party, No. 23/84, No. 2/84. Baku, 1985/Алиева А.К.).

The displacement amplitude of the central block increases to 100–120 m in the southwestern flank of the structure and up to 1500 m in the northeastern part. Then, towards the southeast from the transverse fault, the central block has risen in the form of a horst by 1300 m relative to the southwestern flank and 400 m relative to the northeastern flank [Babeshko et al., 2025; Di Toro et al., 2011; Ding et al., 2023] (Study of sandy horizons and evaluation of oil and gas prospectivity in the Sangachal-sea – Babek uplift zone (including 8 March and Alet-sea fields). Final Report. KMAIB. Baku. 2014. 494 p. / Guliyev Z.I., Shirinova S.A. et al.).

The two main longitudinal faults converge with increasing depth and probably merge into a single fault in the underlying sediments [Abdullayev et al., 2024; Chernov et al., 2020]. Another arcuate longitudinal fault with a displacement amplitude of 300 m is observed on the northeastern flank of the structure, which caused the lowering of the northeastern block. In addition, the northeastern flank of the structure is complicated by several small transverse fractures with an amplitude of 40–50 m. These faults gave a blocky structure to the northeastern flank of the fold.

Structural outcrop is observed on all horizons of the PL on the far northeastern flank of the Duvanni fold. It increases the probability of the formation of saddle-type structural structures in the sediments below the PL within the Jeyrankechmez depression [Abdullayev et al., 2024; Hasanov et al., 2022, 2023; Iskenderov et al., 2017] (Study of sandy horizons and evaluation of oil and gas prospectivity in the Sangachal-sea – Babek uplift zone (including 8 March and Alet-sea fields). Final Report. KMAIB. Baku. 2014. 494 p. / Guliyev Z.I., Shirinova S.A. et al.).

The Duvanni-Deniz Fold has a more complex geological and tectonic structure compared to neighboring structures. Its central part is complicated by large transverse and longitudinal tectonic faults, large mud volcano and graben-type dislocations (Study of sandy horizons and evaluation of oil and gas prospectivity in the Sangachal-sea – Babek uplift zone (including 8 March and Alet-sea fields). Final Report. KMAIB. Baku. 2014. 494 p. / Guliyev Z.I., Shirinova S.A. et al.). From the island of Zambil (Duvanni) to the northwest,

PL sediments are observed in the form of tectonic breccias, and the fractures are filled with mud volcano breccias. These breccias are oriented southwest and northwest from the Abikh volcano and are covered by modern sediments with a thickness of more than 100 meters [Alizadeh et al., 2024; Di Toro et al., 2011; Ding et al., 2023] (Study of sandy horizons and evaluation of oil and gas prospectivity in the Sangachal-sea – Babek uplift zone (including 8 March and Alet-sea fields). Final Report. KMAIB. Baku. 2014. 494 p. / Guliyev Z.I., Shirinova S.A. et al.).

The main longitudinal fault associated with the mud volcano divides the central part of the graben into southwest and northeast segments in the anticline zone. The Khara-Zira Island structure is located approximately 25 km southeast of Cape Sangachal and represents the last uplift within the Sangachal-Deniz–Duvanni-Deniz–Khara-Zira (SDXZ) anticline fold zone (Fig. 1).

Methodological Approach

Seismic logging (SL) and vertical seismic profiling (VSP) were carried out on wells drilled in the study area – Sangachal-Deniz-124, Sangachal-Deniz-440 and Khara-Zira-568, as well as well No. 578 of the 8 March field. The velocity model was built based on data from SL-VSP surveys and Common Depth Point (CDP) seismic surveys conducted in these wells. In well No. 124, located in the northwestern part of the Sangachal-Deniz structure, the geological section begins at a depth of 4,145 meters. In this well, SL and VSP surveys were conducted in the depth interval of 140–2280 meters. In well No. 440, also located in the northwestern part, the geological section begins at 4,769 meters and SL-VSP works were carried out in the depth interval of 2,750–4,500 meters within the same structure [Yusubov, Guliyev, 2015; Valiyev, 2016; Di Toro et al., 2011; Ding et al., 2023]. The geological section in well Khara-Zira-568, located in the southern part of the site, begins at a depth of 5126 meters. In this well, the SL-VSP data covers the interval 0–4537 meters, which allowed the structure to be studied at a wider depth interval.

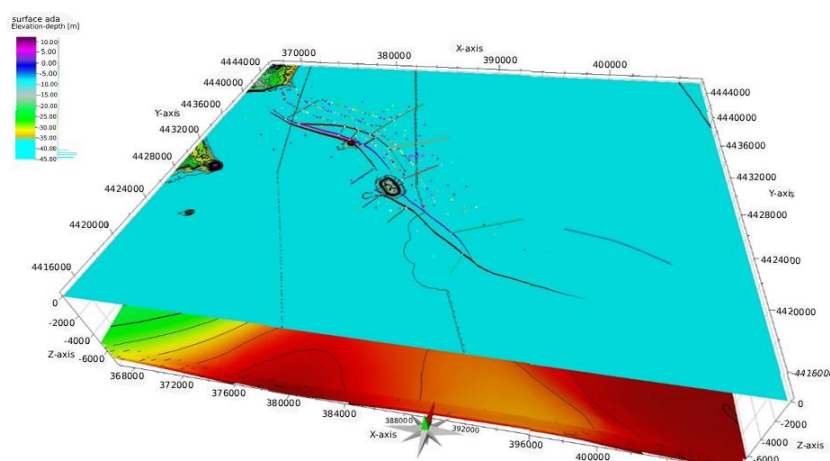


Fig. 1. 3D model of the SDXZ structure in the study area constructed based on bathymetric data

The geological section in well No. 578, located in the northern part of the 8 March area, covers a depth interval of 430–5653 meters. The SL and VSP surveys conducted here were carried out in the interval of 0–4967 meters.

The research work carried out in all the mentioned wells is of great importance both in terms of accurately defining the structure of geological sections and in terms of identifying potential oil and gas reservoirs. The variety of research intervals reflects the geological complexity of the structure and the depth variability in the area [Liu et al., 2024; Hasanov et al., 2022, 2023; Iskenderov et al., 2017]. SL-VSP surveys in these wells cover the interval

0–4967 meters and the vertical hodograph in the sections after the mentioned depth was formed by extrapolation. The conversion of dynamic time sections into depth sections and the transformation of seismic horizons into depth coordinates were carried out based on the averaged vertical hodograph [Mitchell et al., 2015] presented in the Figure 2.

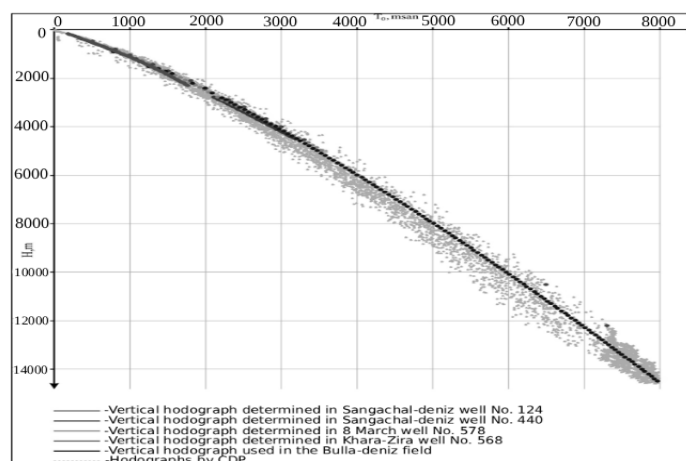


Fig. 2. Average vertical hodograph computed as a result of SL-VSP work carried out in wells

Results of seismo-geological surveys and geological assessment of structures

The geological assessment was carried out based on seismic profiles developed both in the current period (on 29 profiles) and in previous years, as well as Geophysical Well Survey (GWS) data. The exploration work covered the Sangachal-Daniz-Duvanni-Daniz-Khara-Zira structures and the Jeyrankechmez depression. As a result of the seismo-geological assessment, structural maps were plotted for eight seismic horizons in the stratigraphic intervals starting from the lower parts of the Miocene sediments to the surface of the PL complex (Study of sandy horizons and evaluation of oil and gas prospectivity in the Sangachal-sea – Babek uplift zone (including 8 March and Alet-sea fields). Final Report. KMAIB. Baku. 2014. 494 p. / Guliyev Z.I., Shirinova S.A., et al.) [Shakarov et al., 2005; Svalova, Zaalishvili, 2014]. Seismic sections revealed a weak, low-frequency reflection pattern across the diatom-Cretaceous interface interval (~4.6–10.1 km depth), characterized by short in-phase axes and low-amplitude seismic anomalies. In this section, an angular unconformity was observed, especially between the seismic horizons. The dip angles of the reflection surfaces of the Miocene strata complex in some cases reach 30–35°. These reflections were clearly observed only in the seismic sections of the surveys conducted in 2016–2017, and were not recorded in the sections of the profiles obtained in 1991 due to insufficient depth [Valiyev, 2016; Iskenderov et al., 2017; Shakarov et al., 2005; Mitchell et al., 2015]. Consequently, structural maps at this level were plotted only based on data from 2016–2017. Due to suboptimal seismic data in the southwestern segments of the Sangachal-Daniz and Duvanni-Daniz structures, reflective boundaries of horizons are poorly resolved in the corresponding seismic sections (Study of sandy horizons and evaluation of oil and gas prospectivity in the Sangachal-sea – Babek uplift zone (including 8 March and Alet-sea fields). Final Report. KMAIB. Baku. 2014. 494 p. / Guliyev Z.I., Shirinova S.A. et al.) [Zaalishvili et al., 2023]. Along the anticlinal line connecting the Sangachal-Daniz, Duvanni-Daniz and Khara-Zira structures, which is surrounded by isohypses of 4200–6800 m on the plotted structural map, the structures extend in the North-West – South-East direction and appear as folds within seismic profile X₁ and asymmetric structure (Fig. 3).

The tectonic fault systems of various sizes traced in the study area had a significant impact on both the structural formation and their morphological characteristics. The I–I fault, located in the northwest of the site, extends in a southeastern direction starting from the Sangachal-Deniz structure and terminates in the profile region X₂. The amplitude of this fault is 400 meters. The II–II fault, originating from the X₃ profile area, initially trends

southeast and subsequently bends eastward following the hinge zone of the Khara-Zira structure. The III–III fault traced on the northeastern flank of the Sangachal-Deniz uplift has an arc-shaped shape and connects with the northern part of the Duvanni Island uplift in the southeast.

As a result of this fault, the northeastern flank of the Sangachal-Deniz structure has been broken and lowered relative to the southwestern flank. In the arched part of the Duvanni structure X_4 , the amplitude of this fault approaches zero.

From this point, the kinematic sign of the fault in the southeast periclinal direction changes, and the northeast flank rises higher than the southwest flank. The amplitude of the tectonic fault in the X_4 profile region is 1300 m and near Khara-Zira Island it is 2100 m, and further east it decreases to 200 m (Fig. 4 and Fig. 5). In the study area, changes in stress regime (geodynamic stress) with depth have resulted in the northeastern (NE) flanks of the Duvanni-Deniz and Khara-Zira structures being uplifted relative to their southwestern (SW) flanks. In all three structures, the broad NE flanks are complicated not only by longitudinal faults but also by transverse faults (Study of sandy horizons and evaluation of oil and gas prospectivity in the Sangachal-sea – Babek uplift zone (including 8 March and Alet-sea fields). Final Report. KMAIB. Baku. 2014. 494 p. / Guliyev Z.I., Shirinova S.A., et al.) [Iskenderov et al., 2017].

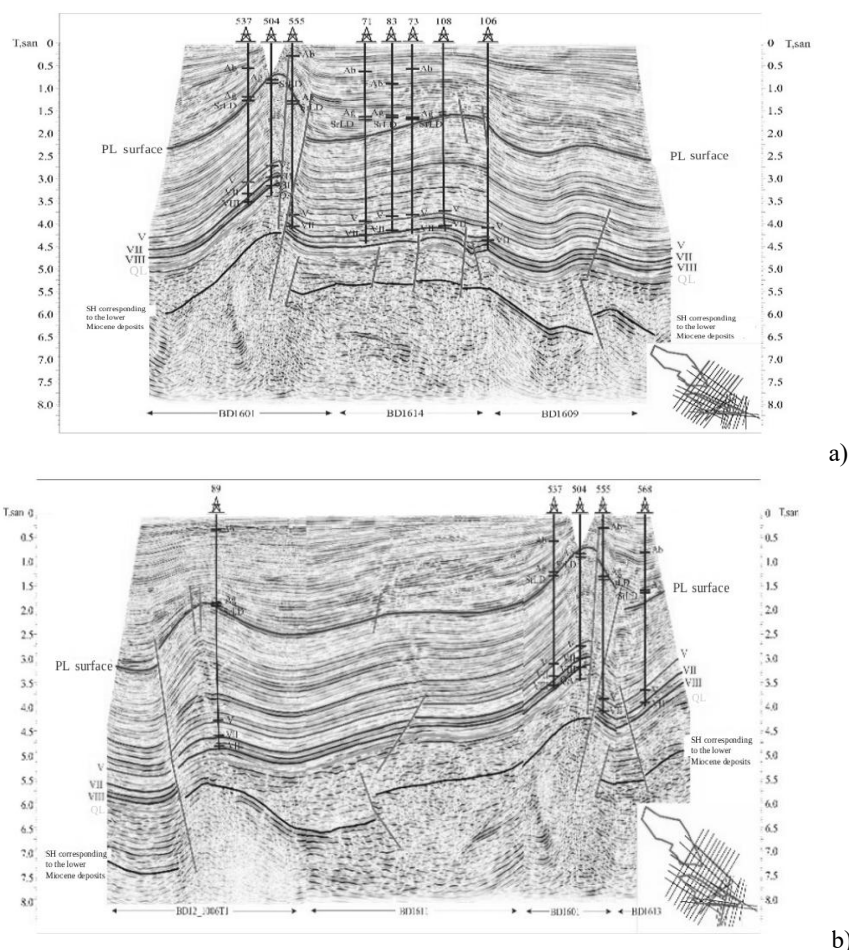


Fig. 4. Stratigraphic correlation of seismic horizons (SHs) to wells along profiles
a) X_2 I-I and b) X_3 II-II

The IV–IV transverse tectonic fault, which runs through the northeastern flank of the Sangachal-Deniz structure, gradually dies out in the direction of the monoclinical dip of the layers

and is demonstrated with an amplitude of 10–50 m. As a result of this fault, the northwestern part of the flank has been broken and lowered relative to the southeastern part.

The V–V transverse fault, which passes through the arch of the Duvanni-Deniz structure, extends towards the 8 March structure, lowering the northwestern part of the structure relative to the southeast with an amplitude of 30–80 m. Transverse faults VI–VI and VII–VII caused the strata to gradually break to the northwest with an amplitude of 20–60 m in the southeastern part of the northeastern flank of the Duvanni-Deniz structure.

The Khara-Zira structure, the last uplift of the anticline zone, is separated from the Duvanni-Deniz structure by a low-strength synclinal saddle (Study of sandy horizons and evaluation of oil and gas prospectivity in the Sangachal-sea – Babek uplift zone (including 8 March and Alet-sea fields). Final Report. KMAIB. Baku. 2014. 494 p. / Guliyev Z.I., Shirinova S.A. et al.). The NE flank is wider and has a complex tectonic structure. This flank descends to the north by up to 8000 m and is a continuation of the Jeyrankechmez depression in the sea. This flank of the structure is complicated by transverse faults VIII–VIII and longitudinal faults IX–IX. As a result of the VIII–VIII fault, the strata broke to the southeast with an amplitude of 20–40 m. The IX–IX fault caused the strata to break to the center with an amplitude of 70–80 m in the central part of the structure and fall towards the center, while the amplitude gradually decreases at the edges [Iskenderov et al., 2017; Shakarov et al., 2005; Hasanov et al., 2022].

The structure has an asymmetric formation. In the north-eastern flank, the dip angle of the layers is 18–20° in the uplifted part, and in the direction of descent this angle decreases to 5–10°. In the south-western flank, these angles are 4–8°. The south-western flanks of both the Duvanni-Deniz and Khara-Zira structures are complicated by tight transverse faults with an amplitudes ranging from 10–100 m. As a result of these faults, the layers are gradually broken and dip from the northwest to the southeast. The southern part of the south-western flank of the Duvanni-Deniz structure is limited by longitudinal faults XIV–XIV and XV–XV, and these faults are represented with an amplitude of 10–40 m.

Tectonic Structure of Khara-Zira and nearby Structures in the PL Complex

The fault located in the south of the study area and starting in the X₂ profile area, together with II fault, reaches 2,300 m in the X₃ profile area, west of the Khara-Zira area (Report. Marine Seismic Party, No. 23/84, No. 2/84. Baku, 1985/Алиева А.К.).

The amplitude of these faults decreases towards the southeast. The amplitude of the II-II fault decreases to 200 m in the X₂ and X₃ profile regions. The II fault, which is observed in the grounds, dies out in the southeastern part of the area, in the profile region. In addition to tectonic faults, the geological structure of the Khara-Zira structure is also complicated by the influence of mud volcanoes. The fold along the Productive Suite (PS) complex within this structure is asymmetrical. The north-east (NE) flank of the fold dips at an angle of 14–18°, while the south-west (SW) flank dips at an angle of 11–16°. The NE flank, covering a wider area, has a simple structure; the layers dip monoclinally in this direction and merge into the marine continuation of the Jeyrankechmez depression at a depth of 6500 m [Iskenderov et al., 2017; Yusubov, Guliyev, 2015].

The thin SW flank is dislocated by two transverse tectonic faults XII-XII and XIII-XIII. Under the influence of these faults, the layers have been broken to the southeast and have displaced downward towards the syncline separating the Khara-Zira structure from the Bulla-Deniz structure. The southward descent of the layers is clearly observed in profiles. The southeastern periclinal extends for a distance of approximately 15 km, at an angle of 6–8°, and descends to a depth of 6,800 m.

The SW flank of this periclinal is thin and is limited by a large amplitude, longitudinal axis-oriented and reverse-fault type II-II fault (Report. Marine Seismic Party, No. 23/84, No. 2/84. Baku, 1985/Алиева А.К.).

As a result, the SE flank of the structure has collapsed relative to the NE flank. Slightly

north of the II-II fault, the IX-IX longitudinal fault with an amplitude of 20–40 m is observed. As a result of this fault, the arch section has collapsed relative to the northern flank.

The local syncline separating the Khara-Zira structure from the Bulla-Deniz structure has a centriclinal structure, and the NE slope is complicated by tectonic faults of the XIII-XIII longitudinal and transverse structures (amplitude 20–80 m).

The marine continuation of the Ceyrankechmez depression, located in the northeast of the site, is observed in the form of two undulations [Iskenderov et al., 2017; Hasanov et al., 2023]. Its deepest part is located in the northeast of the site and is indicated by the 6900 m isohypse. These fragments are separated from each other by the elevation noted in the profile area.

The syncline observed in the southwest of the site consists of two parts, separated from each other by the Khara-Zira Island (Report. Azerbaijan SSR, 1963–1964, SP 1/63, 2/63. Goberman, K.I.). The deepest part of this syncline (7700 m) is located in the southeast of the site. In the structural map of the V horizon of the Productive Series (PS), the general structural plan of the site is same with the structure of the VII horizon of the PS. The dip angles of the layers on the flanks of the structure, the direction and amplitude of the faults are almost at the same level. The arch parts of both the Duvanni-Deniz and Khara-Zira structures have been accurately plotted based on well data [Abdullayev et al., 2024; Yektirmishli et al., 2023; Zaalishvili et al., 2023].

On the structural map of the PL (Pliocene) complex surface, the geological-tectonic structure generally repeats the configuration of the underlying horizons however, certain differences are observed. Specifically, in the Sangachal-Deniz–Duvanni-Deniz area, within the crestal part of fold zones, the top of the PL deposits has been denuded to depths of 800–900 m. The flanks of the structure are primarily represented by the Agchagil and Absheron deposits.

The denudation of the crestal parts of the Sangachal-Deniz and Duvanni-Deniz anticlinal uplifts has made it difficult to distinguish these structures on the map. But, on the NE flank (northeastern flank), these structures are clearly separated by a broad syncline. At this level, changes are observed in the location and orientation of tectonic faults compared to lower levels. Some faults traced in the lower horizons are not observed on the PL surface. For example, Faults I-I and II-II, originating from the arch of the structure, extend south-eastward parallel to the axis of the Khara-Zira structure. Fault I-I dies out in the area of, while Fault II-II terminates slightly later in the area of Profile (Fig. 4 and Fig. 5).

In the Khara-Zira area, some tectonic faults are observed only at the PL level. The amplitude of these faults is relatively small (approximately 50 m) and they are of different directions and signs, complicating the structure's topography.

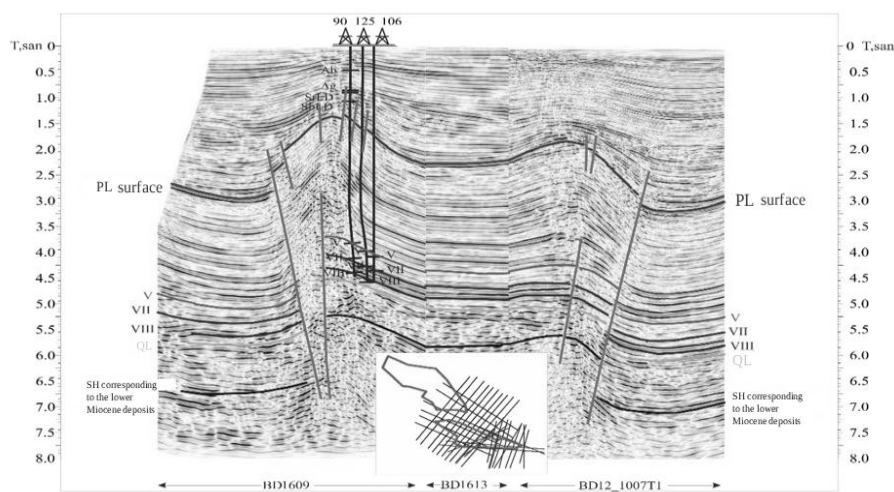


Fig. 5. Stratigraphic correlation of SS's to wells along the line of III-III

In the Khara-Zira area, some tectonic faults are observed only at the PL level. The amplitude of these faults is relatively small (approximately 50 m) and they are of different directions and signs, complicating the structure's topography.

The Khara-Zira structure separated from the syncline Duvanni-Deniz structure by a weakly expressed saddle. The northeastern flank of all three structures dips monoclinally and merges with the marine continuation of the Jeyrankechmez depression. The Jeyrankechmez depression is reflected in this area in the form of two undulations expressed at isohyps 2400 and 3100 m [Abbasov, 2004; Shakarov et al., 2005; Valiyev, 2016]. These undulations are separated from each other by the dip of the northern flank of the Duvanni-Deniz structure in that direction.

The conventionally drawn SE flank of the Sangachal structure descends and merges with the Alat-Umid syncline. The southwestern wing of the Duvanni-Deniz and Khara-Zira structures is narrow and passes directly into the Alat-Umid syncline.

Conclusion

Comprehensive analysis of WGS and other geophysical data obtained in recent years indicate, that these data are not only important for expanding the productive horizons of existing reservoirs, but also hold significant scientific and practical value for assessing the hydrocarbon potential of deeper, as-yet insufficiently studied strata. Particularly, in accordance with the objectives of the research, the following can be noted:

1. The Khara-Zira structure is separated from the Sangachal-Duvanni-Deniz synclinal structures by a weakly defined saddle. The northeastern flank of all three structures is monoclinally inclined and merges with the offshore continuation of the Jeyrankechmez Depression. All structures within the anticlinal zone, including Khara Zira, have an asymmetric form. The northeastern flanks of the structure are inclined at an angle of 25–30°, while the southwestern (SW) flanks are inclined at a lesser angle of 18–20°. In general, the axis of the structure initially extends in a northeast-southeast direction and then deviates to the east.

2. In the Khara-Zira region, some tectonic downward only at the Paleozoic level. The amplitude of these faults is relatively small (approximately 50 m), they are directed differently, and have different signs, which complicates the structure's topography. In the arched part of the Khara Zira structure, the top of the Paleozoic occurs at a depth of 950–1000 m. The structure here resembles a normally shaped anticlinal fold, and the arched part enclosed by a 950 m contour line. At this level, the northeastern pericline of the Khara Zira structure is not traceable relative to the submerged horizons, and the structure represents only an extended northeastern pericline. The bottom of the Paleozoic occurs from 4000 to 8000 meters in the northeast and from 3100 to 7500 meters in the southwest.

3. In addition to tectonic faults, the geological structure of the Khara-Zira structure is also complicated by the existing of mud volcanoes. Precisely, the thin SW flank of the Khara-Zira is complicated by two transverse tectonic faults XII-XII and XIII-XIII. Under the influence of these faults, the layers have been broken to along southeast and have displaced downward towards the syncline separating the Khara-Zira structure from the Bulla-Deniz structure. The southeastern periclinal extends for a distance of approximately 15 km, at an angle of 6–8°, and descends to a depth of 6800 m. The SW flank of this periclinal is thin and is limited by a large amplitude, longitudinal axis-oriented reverse II-II fault. As a result, the SE flank of the structure has moved relative to the NE flank. Slightly north of the II-II fault, the other (IX-IX) longitudinal fault with amplitude of 20–40 m is observed. Because of this fault, the arch section looks collapsed relative to the northern flank.

References

1. Abbasov E.Y. Modeling the dynamics of reservoir properties of sedimentary rocks in the Azerbaijani sector of the South Caspian Basin (on the example of Hovsan, Sangachal, Khara-Zira fields). In: Materials of the scientific-practical seminar dedicated to the 10th anniversary of the "Contract of the Century" and "Oil Workers' Day". Baku. 2004. pp. 46–47.
2. Abdullayev N., Guliyev I., Kadirov F., Huseynova S., Javadova A., Maharramov B., Mukhtarov A. Novel interpretation of the crustal structure and hydrocarbon evolution within the South Caspian and Kura sedimentary basins, Azerbaijan. *Geophysical Journal*. 2024. Vol. 46(3). pp. 125–135 p.
3. Alizadeh A., Guliyev I., Mamedov P., Aliyeva E., Feyzullayev A., Huseynov D. Pliocene hydrocarbon sedimentary series of Azerbaijan. Springer. 2024. 507 p.
4. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Evdokimov V.S., Zaretskaya M.V., Khripkov D.V. On the precursor of increased seismicity in the area of transition from mountainous to flat territory. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 1. pp. 45–55. DOI: 10.46698/VNC.2025.25.51.004. (In Russ.)
5. 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. (In Russ.)
6. 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.
7. Ding P., Zhang F., Chai Y., Luo P., Gao L. Seismic physical modeling study for a shale oil reservoir with complex lithofacies and meter-scale structures. *Geophysics*. 2023. Vol. 88(6). B179–B193. DOI: doi.org/10.1190/geo2022-0582.1
8. Hasanov A.B., Abbasov E.Y., Garayeva T.J., Mammadova D.N. Analysis of geological and geophysical knowledge of the Productive Series in the South Caspian Basin (forecasting issues within the sedimentary complex). Baku. Azerbaijan National Academy of Sciences, Oil and Gas Institute; Azerbaijan State University of Oil and Industry. 2022. 159 p.
9. Hasanov A.B., Abbasov E.Y., Mammadova D. Graphical 3D detailing of the bottom hole part of the well with the identification of drainage zones within the productive interval. In: SPE Caspian Technical Conference and Exhibition. Baku, Azerbaijan. 2023. Paper Number: SPE-217648-MS. DOI: 10.2118/217648-MS.
10. Iskenderov M.M., Abuzarova A.G., Kazimov R.R., Samedzade A.A. Some results of lithological-facies analysis of terrigenous deposits of the PS in the Sangechal–Duvanny–Khara Zira uplift zone. *News of the National Academy of Sciences*. 2017. Vol. 9. pp. 3–11.
11. Liu E., Zhang F., Huo S., Ding P., Li X. Viability of fracture characterization using seismic attributes through seismic physical modeling. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2024. Vol. 21(6). pp. 1651–1666. DOI: 10.1093/jge/gxae094.
12. 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.
13. Shakarov H.T., Veliyev H.O., Abbasov E.Y. Some results of reinterpretation of well log data considering seismogeodynamic changes. In: Proceedings of the 5th International Conference of the EAGE Azerbaijan Chapter: "Petroleum Geology and Hydrocarbon Potential of the Caspian and Black Sea Regions". Baku. EAGE-ASPG. 2005. pp. 276–278.
14. Svalova V.B., Zaalishvili V.B. Deep geodynamics and seismicity of the Caucasus Anatolian region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 77–89. DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006. (In Russ.)
15. Valiyev H.O. Geodynamic model, seismic activity of the South Caspian Basin, and perspective direction of oil and gas field exploration. *Seismoprognostic Observations of the Territory of Azerbaijan*. 2016. Vol. 13(1). pp. 32–37. (In Russ.)

16. Xavier M., Van Goethem N., Novotny A.A. Hydro-mechanical fracture modeling governed by the topological derivatives. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2020. Vol. 365. Art. No. 112974. DOI: 10.1016/j.cma.2020.112974.
17. Yetirmishli G., Kazimova S., Kazimov I. Oil and gas potential and modern seismicity of the Azerbaijan sector of the Caspian Sea. *Geophysical Journal*. 2023. Vol. 45(1). DOI: 10.24028/gj.v45i1.275184.
18. Yusubov N.P., Guliyev I.S. Lithological-facies models of Garadagh, 8 March, Sangachal-sea, Duvanny-sea, Bulla Island and Bulla-sea fields associated with the “unconformity suite” based on GIS data. *Azerbaijan Oil Industry*. 2025. Vol. 5. pp. 3–8.
19. Zaalishvili V.B., Hasanov A.B., Abbasov E.Y. Detailing the pore structure of productive intervals of oil wells using color 3D imaging. *Energies*. 2023. Vol. 16(1). Art. No. 217. DOI: 10.3390/en16010217.

УДК 553.411.071 (571.5)

DOI: 10.46698/VNC.2026.70.42.001

Оригинальная статья

Геофизические признаки золотоносности рудно-магматических систем Северной Осетии (Алании)

С.Г. Парада 

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

Статья поступила: 12.01.2026, доработана: 16.03.2026, принята к публикации: 19.03.2026

Резюме: Актуальность определяется необходимостью создания научной основы переоценки известных рудных районов на наличие высоколиквидных руд золота и поисков новых золоторудных объектов на неисследованных ранее территориях для диверсификации горнодобывающей и металлургической отраслей промышленности Северной Осетии (Алании). **Цель.** Выявить геофизические признаки оруденения цветных и благородных металлов и потенциальной золотоносности рудно-магматических систем. **Методы.** Анализ результатов использования геофизических данных при выполнении работ в пределах перспективных на золото территорий. Построение совмещенной карты локальных аномалий гравитационного и магнитного полей на основе анализа амплитудных характеристик с использованием базы геофизических данных к Геологической карте Российской Федерации масштаба 1:1000000 по листу К-38,39 (Махачкала). Анализ распределения в пространстве месторождений и проявлений цветных и благородных металлов относительно геофизических аномалий. **Полученные результаты и их обсуждение.** Проанализирован опыт использования геофизических данных при выполнении работ в пределах перспективных на золото территорий Приамурья. Приведены результаты обработки данных геофизических съемок по горной части территории Северной Осетии (Алании) с применением современных методов преобразования потенциальных полей. Составлены сводные карты локальных аномалий гравитационного и магнитного полей. В пределах Северной Осетии (Алании) выявлены особенности пространственного положения месторождений и рудопроявлений цветных и благородных металлов относительно аномалий гравитационного и магнитного полей. Установлена приуроченность рудно-магматических систем гранитоидного типа к отрицательным аномалиям силы тяжести. Показано, что потенциально золотоносные рудно-магматические системы при этом располагаются в пределах положительных аномалий магнитного поля.

Ключевые слова: потенциальные поля, аномалии, рудно-магматические системы, цветные металлы, золото.

Для цитирования: Парада С.Г. Геофизические признаки золотоносности рудно-магматических систем Северной Осетии (Алании). *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 134-141. DOI: 10.46698/VNC.2026.70.42.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.70.42.001

Original paper

Geophysical signs of gold-bearing ore-magmatic systems of North Ossetia (Alania)

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: 12.01.2026, revised: 16.03.2026, accepted: 19.03.2026

Abstract: The relevance is determined by the need to create a scientific basis for the reassessment of known ore regions for the presence of highly liquid gold ores and the search for new gold mining facilities in previously unexplored territories to diversify the mining and metallurgical industries of North Ossetia (Alania). **Aim.** To identify the geophysical signs of mineralization of non-ferrous and precious metals and the potential gold content of ore-magmatic systems. **Methods.** Analysis of the results of using geophysical data when performing work within the territories promising for gold. Construction of a combined map of local anomalies of gravitational and magnetic fields based on the analysis of amplitude characteristics using a database of geophysical data for a 1:1000000 scale Geological map of the Russian Federation according to sheet K-38.39 (Makhachkala). Analysis of spatial distribution of deposits and manifestations of non-ferrous and precious metals relative to geophysical anomalies. **The results obtained and their discussion.** The experience of using geophysical data when performing work within the territories of the Amur region that are promising for gold is analyzed. The results of data processing of geophysical surveys in the mountainous part of the territory of North Ossetia (Alania) using modern methods of potential field transformation are presented. Summary maps of local anomalies of the gravitational and magnetic fields have been compiled. The peculiarities of the spatial position of deposits and ore occurrences of non-ferrous and precious metals relative to anomalies of gravitational and magnetic fields have been revealed within North Ossetia (Alania). The occurrence of ore-magmatic systems of the granitoid type to negative gravity anomalies has been established. It is shown that potentially gold-bearing ore-magmatic systems are located within positive magnetic field anomalies.

Keywords: potential fields, anomalies, ore-magmatic systems, non-ferrous metals, gold.

For citation: Parada S.G. Geophysical signs of gold-bearing ore-magmatic systems of North Ossetia (Alania). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 134-141. DOI: 10.46698/VNC.2026.70.42.001

Введение

Одной из основ устойчивого развития горных территорий Северного Кавказа является диверсификация горнодобывающей и металлургической отраслей промышленности. С одной стороны предлагается разработка и внедрение новых более эффективных технологий добычи и переработки традиционных для региона редко-металльных и полиметаллических руд [Дребенштедт и др., 2018], с другой – переоценка известных рудных районов на наличие высоколиквидных руд золота и поиски новых золоторудных объектов на неисследованных ранее территориях [Parada et al., 2017; Иванов и др., 2018; Zurcher et al., 2019]. В последнем случае имеется возможность предварительной оценки потенциальной золотоносности территорий на основе современных геофизических технологий.

Обобщение опыта использования геофизических данных при выполнении работ в пределах перспективных на золото территорий и конкретные примеры приведены в многочисленных работах [Заалишвили и др., 2015; Kerr et al., 2016; Ma Xiao-lei et al., 2016; Guangxi Zliou Yequan et al., 2016; Калмыков и др., 2017]. Геофизические данные позволяют не только выявлять рудно-магматические системы, но и оценивать их металлогенический потенциал [Hart, 2007; Root et al., 2017], в т.ч. в пределах горных территорий Северного Кавказа [Парада, Чотчаев, 2019].

Материал и методы

Для исследования использована база геофизических данных в виде цифровых моделей полей гравиразведки и аэромагниторазведки, заданных в узлах регулярной сети 1000'1000 м к комплексу карт геофизической основы Геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 по листу К-38,39 (Махачкала), разработанной в ВИРГ-Рудгеофизика им. А.А. Логачева МПР РФ, Санкт-Петербург, 2002 г. По этим данным построены карты локальных аномалий гравитационного и магнитного полей, выделенных на основе анализа амплитудных характеристик и отражающих распределение плотностных характеристик пород верхней части разреза.

Локальные аномалии получены как разность между исходным и осредненным в окне 20'20 км полем. Карты локальных аномалий обладают большой информационной емкостью, поскольку одновременно отражают амплитудные, морфологические и текстурные особенности полей. Поскольку изучаемая территория характеризуется высокой геологической неоднородностью, локальные составляющие поля рассчитаны как разность наблюдаемого и осредненного в локальной области поля. При построении совмещенного изображения полей карта гравитационного поля отображается в виде карты изолиний (в цветной шкале). Карта локальных аномалий магнитного поля отображается в виде областей, ограниченных изолинией «аномально-го» значения, которое соответствует квантилю эмпирического распределения около 90%.

По уровню локальных аномалий гравитационного поля выделяется целый ряд отдельных блоков и структур, границы между которыми, направление их простирания и соотношение друг с другом подчеркивается системой геофизических линеаментов, выделенных по горизонтальным градиентам гравитационного поля. Последние формируют структурно-тектонический каркас территории.

Магнитное поле представлено в виде положительных локальных аномалий в диапазоне значений от 20 до 2400 нТл (локальные аномалии получены как разность между исходным и пересчитанным на высоту 2 км полем). Локальные положительные аномалии магнитного поля, обусловленные преимущественно интрузивными образованиями в верхней части разреза в сочетании с линеаменами, выделенными по градиентам гравитационного поля, органично подчеркивают и дополняют сформировавшуюся блокировку территории.

Результаты и обсуждение

При исследованиях золотоносных районов Востока России [Eirish, 2009] было установлено, что возможность золотого оруденения конкретной рудно-магматической системы определяется в области генерации магмы и рудоносных растворов. Это связано с геохимическими свойствами Au, которое обладает очень низким кларком ($n \cdot 10^{-7}$ %). При развитии гранитоидного магматизма это приводит к тому, что все содержащееся в расплаве золото изоморфно захватывается кристаллизующимися

силикатами. И только излишки металла против эвтектических соотношений при соответствующих термодинамических условиях могут покинуть расплав и обогатить рудоносный раствор. Гранитная магма сама по себе такими излишками не обладает. Они могут возникнуть при взаимодействии гранитной магмы с предварительно обогащенным золотом субстратом [Щербаков, 1976]. В качестве такого субстрата, такой геохимической системы могут выступать магматические породы и магмы основного и ультраосновного состава, обладающие изначально повышенным кларком золота, и некоторые, обогащенные золотом черносланцевые толщи. Этим объясняется приуроченность большинства золоторудных месторождений мира преимущественно к вулканогенным комплексам основного состава и к углеродисто-терригенным комплексам [Safonov, 1997].

Таким образом, при глубинном взаимодействии кислого магматизма с фемическим субстратом и (или) черносланцевыми толщами могут формироваться области генерации золотоносных флюидов. Следовательно, чтобы оценить перспективы золотоносности рудно-магматических систем, необходимо определить наличие фемического субстрата или обогащенных золотом черносланцевых толщ в области генерации и миграции кислых магм и сквозьмагматических флюидов.

Области глубинного взаимодействия кислого магматизма с фемическим субстратом, при котором генерируются золотоносные флюиды, предлагается выявлять на основе геофизических данных. Для этого необходимо определить наличие фемического субстрата в области генерации и миграции кислых магм и сквозьмагматических флюидов. В работах [Носырев, 2016; Парада, Чотчаев, 2019] показано, что такие ситуации можно выявлять, используя гравиметрические и магнитометрические карты. Гравиметрические карты позволяют в грубом приближении разделить территорию на существенно фемические и салические области, т.е. потенциально золотоносные и потенциально не золотоносные. Первые из них обычно характеризуются регионально повышенными, вторые – регионально пониженными значениями силы тяжести. В пределах тех и других выделяются локальные отрицательные гравитационные аномалии, связанные с телами гранитоидов, которые могут частично обнажаться на поверхности, подтверждая вещественный состав этих гравитационных минимумов. На аэромагнитных картах также выделяются области фемического субстрата, характеризующиеся повышенным магнитным полем. Совмещение локальных структур разуплотнения с положительными аномалиями магнитного поля может отражать глубинное взаимодействие гранитоидной магмы с фемическим субстратом, т.е. ситуацию, благоприятную для генерации золотого оруденения. Локальные гравитационные минимумы в этом случае будут указывать на вероятные очаги гранитоидного магматизма. Области повышенного магнитного поля могут указывать на фемический субстрат. Участки совмещения таких областей характеризуют ситуацию, благоприятную для генерации золотого оруденения.

Так, например, в результате проведенных геофизических исследований в Верхнем Приамурье осуществлена оценка потенциальной золотоносности выделенных ранее аномальных геохимических полей с опорой на рудные узлы с известной золотоносностью [Вьюнов и др., 2007]. Важными факторами контроля золоторудных узлов оказались отрицательные аномалии силы тяжести, связанные с центрами рудогенерирующего магматизма, а также совмещенные в той или иной степени с ними положительные аномалии магнитного поля. Последние фиксируют области взаимодействия кислой магмы с фемическим субстратом, что проявляется в обогащении магнитными минералами приконтактных и апикальных зон интрузивов.

На рисунке 1 представлена схема размещения рудных месторождений и рудопроявлений горной части Северной Осетии (Алании).

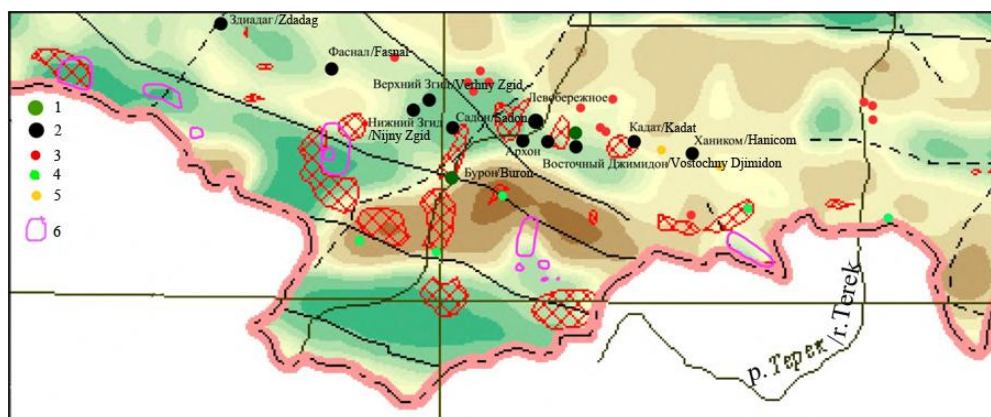


Рис. 1. Положение месторождений и рудопроявлений горной части Северной Осетии (Алании) относительно гравитационных максимумов (коричневый), гравитационных минимумов (бирюзовый) и положительных магнитных аномалий (красная штриховка).

1-2 – месторождения: 1 – золото-серебряные, 2 – свинцово-цинковые, 3-5 – рудопроявления золото-сульфидные, 4 – медно-полиметаллические, 5 – золото-серебряные; 6 – контуры распространения неинтрузий /

Fig. 1. The position of deposits and ore occurrences in the mountainous part of North Ossetia (Alania) relative to gravitational maxima (brown), gravitational minima (turquoise) and positive magnetic anomalies (red hatching). 1-2 – deposits: 1 – gold-silver, 2 – lead-zinc, 3-5 – gold-sulfide ore occurrences, 4 – copper-polymetallic, 5 – gold-silver; 6 – neointrusion distribution contours

Аномальные области геофизических полей выделены на основе анализа амплитудных характеристик. Локальные аномалии получены как разность между исходным и осредненным в окне 20'20 км полем. В результате выделяются отдельные блоки, границы между которыми подчеркиваются системой линеаментов, выделенных по горизонтальным градиентам гравитационного поля. Магнитное поле представлено в виде положительных локальных аномалий в диапазоне значений от 20 до 2400 нТл, полученных как разность между исходным и пересчитанным на высоту 2 км полем. Они обусловлены преимущественно интрузивными образованиями в верхней части земной коры. Сформировавшаяся в результате анализа комплекса геофизических данных схема по существу является геофизической основой для прогнозно-металлогенической карты.

Очевидна связь рудных месторождений основных типов рудно-магматических систем с отрицательными аномалиями гравитационного поля. При этом подавляющее большинство рудно-магматических систем находит в них отражение. Исключением является колчеданный тип. Так Буронский рудный узел с одноименным месторождением колчеданного типа приурочен к периферии положительной аномалии поля силы тяжести.

В большинстве случаев отрицательные аномалии силы тяжести, скорее всего, связаны с центрами рудогенерирующего магматизма. В некоторых случаях с гравитационными минимумами частично или полностью совпадают положительные аномалии магнитного поля. Участки такого совпадения фиксируют глубинные области взаимодействия кислой магмы с фемическим субстратом, что проявляется в обогащении магнитными минералами приконтактовых и апикальных зон интрузивов. Косвенно такое глубинное взаимодействие подтверждается путем геохимического моделирования, выполненного ранее [Гурбанов и др., 1992; Бубнов и др., 2011] и показавшего, что образование пород Теплинского интрузивного комплекса могло происходить за счет частичного плавления основного метаморфического субстрата (амфиболиты буульгенской серии), и что исходный расплав формировался при P_{313} кбар, что соответствует глубинам порядка 40 км.

Во многих случаях в участках такого совпадения располагаются рудные узлы или отдельные их части (рудные поля). Предварительный анализ материалов поисковых работ в пределах таких участков показал наличие золотоносных минерализаций. Особенно это характерно для Танадонского и Сонгутидонского рудных узлов. Следовательно, исходя из изложенной выше концепции, такие участки при наличии прямых признаков золотоносности являются перспективными на обнаружение золотого оруденения.

Выводы

1. Изучение опыта использования геофизических данных при выполнении прогнозных и поисковых работ в пределах перспективных на золото территорий Приамурья показало высокую эффективность и возможность его использования в других регионах.

2. Проведенная обработка данных геофизических съемок по горной части территории Северной Осетии (Алании) с применением современных методов преобразования потенциальных полей позволила составить сводную карту локальных аномалий гравитационного и магнитного полей.

3. Установлена приуроченность рудно-магматических систем гранитоидного типа к отрицательным аномалиям силы тяжести. Потенциально золотоносные рудно-магматические системы при этом располагаются в пределах положительных аномалий магнитного поля.

4. Сформированная в результате анализа комплекса геофизических и минерагенических данных схема по существу является геофизической основой для прогнозно-металлогенической карты.

Литература

1. Бубнов С.Н., Докучаев А.Я., Гольцман Ю.В. N-Q магматизм Большого Кавказа: геодинамическая позиция, геохимическая и металлогеническая специализация, источники расплавов. // Труды института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2011. – № 57. – С. 73–75.
2. Вьюнов Д.Л., Носырев М.Ю., Степанов В.А. Прогнозирование рудных месторождений по геохимическим и геофизическим данным (на примере Верхнего Приамурья). // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. – 2007. – № 3. – С. 2–9.
3. Гурбанов А.Г., Богина М.М., Поль И. Биотиты как индикаторы условий становления плиоценовых гранитов Большого Кавказа. // Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. – 1992. – № 11. – С. 147–153.
4. Дребенштетт К., Голик В.И., Дмитрак Ю.В. Перспективы диверсификации технологии добычи металлов в РСО-Алания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2018. – Т. 10. № 1(35). – С. 125–131. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-1-125-131.
5. Заалишвили В.Б., Чотчаев Х.О., Невский Л.Н., Ольховский Г.П., Тибилев С.М., Гогичев Р.Р. Оптимизация геофизических и геохимических критериев поисков месторождений известных рудных формаций горной части республики Северная Осетия-Алания. // Геология и геофизика Юга России. – 2015. – №3. – С. 28–62.
6. Иванов А.И., Черных А.И., Вартамян С.С. Состояние, перспективы развития и освоения минерально-сырьевой базы золота в Российской Федерации. // Отечественная геология. – 2018. – № 1. – С. 18–28.
7. Калмыков Б.А., Левин Ф.Д., Трусов А.А. Возможности современных аэрогеофизических методов при прогнозировании и поисках золоторудных месторождений. // Золото и технологии. – 2017. – № 2. – С. 76–82.
8. Носырев М.Ю. Геофизические характеристики Бамского золоторудного месторождения (Верхнее Приамурье) и их использование при прогнозировании и поисках месторождений золота. // Тихоокеанская геология. – 2016. – Т. 35. – № 6. – С. 69–80.
9. Парада С.Г., Чотчаев Х.О. Оценка возможной золотоносности рудно-магматических систем Северного Кавказа на основе геофизических данных. // Материалы IX Всероссийской

научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа». М.: ИИЕТ РАН, 2019. – С. 166–172.

10. Щербаков Ю.Г. Химическая эволюция вещества Земли и эндогенное рудообразование. // Золото и редкие элементы в геохимических процессах. Новосибирск: Наука, 1976. – С. 14–33.

11. Eirish L.V. Factors determining origination of gold ore systems in the Russian Far East. // *Geology of Ore Deposits*. – 2009. – Vol. 51. No. 3. – pp. 223–232. DOI: 10.1134/S1075701509030040.

12. Guangxi Z.Y., Pang B., Li Y., Lit J. The metallogenic regularities and metallogenic prognosis for the Xinping gold deposit in Pingnan County. // *Geoscience*. – 2016. – Vol. 30. No. 4. – pp. 770–780.

13. Hart C.J.R. Reduced intrusion-related gold systems. // *Mineral deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division. Spec. Publ.* – 2007. – No. 5. – pp. 95–112.

14. Kerr A.C., Lavis O., Kakar M.I., McDonald I. Petrogenesis and tectonomagmatic significance of Eocene mafic intrusions from the Neotethyan suture zone in the Muslim Bagh-Khanozai region. Pakistan. // *Journal of the Geological Society*. – 2016. – Vol. 173. No. 3. – pp. 2015–062. DOI: 10.1144/jgs2015-062.

15. Ma Xiao-lei, Yuan B., Xu W., Song J.I. et al. The relationship between features of gravity and magnetic field and sandstone-type uranium deposits in the south of Ordos basin. // *Geology and Prospecting*. – 2016. – Vol. 52. No. 4. – pp. 647–656.

16. Parada S.G., Stolyarov V.V., Popov Y.V. New type of gold mineralization of the Tyrnyauz ore cluster (Kabardino-Balkar republic). // *Doklady Earth Sciences*. – 2017. – Vol. 477. No. 1. – pp. 1256–1259. DOI: 10.1134/S1028334X17110058.

17. Root B.C., Ebbing J., van der Wal W., England R.I. et al. Comparing gravity-based to seismic-derived lithosphere densities a case study of the British Isles and surrounding areas. // *Geophysical Journal International*. – 2017. – Vol. 208. No 3. – pp. 1796–1810.

18. Safonov Yu.G. Hydrothermal gold deposits: distribution, geological-genetic types, and productivity of ore-forming systems. // *Geology of Ore Deposits*. – 1997. – Vol. 39. No. 1. – pp. 20–32. Zurcher L., Dunlap P., Bookstrom A.A., Zientek M.L., Wallis J.C., Hammarstrom J.M., Mars J.C., Ludington S.D. Tectono-magmatic evolution of porphyry belts in the Central Tethys Region of Turkey, The Caucasus, Iran, Western Pakistan, And Southern Afghanistan. // *Ore Geology Reviews*. – 2019. – Vol. 111. – pp. 102849–102929. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.02.034.

References

1. Bubnov S.N., Dokuchaev A.Ya., Goltsman Yu.V. N-Q magmatism of the Greater Caucasus: geodynamic position, geochemical and metallogenic specialization, sources of melts. *Proceedings of the Institute of Geology of DSC RAS*. 2011. No. 57. pp. 73–75. (In Russ.)

2. Vjunov D.L., Nosyrev M.Yu., Stepanov V.A. Predicting ore deposits on basis of geochemical and geophysical data (as exemplified by the Upper Amur river area). *Bulletin of the North-East Scientific Center, Far Eastern Branch, RAS*. 2007. No. 3. pp. 2–9. (In Russ.)

3. Gurbanov A.G., Bogina M.M., Pol I. Biotites as indicators of the conditions of formation of Pliocene granites in the Greater Caucasus. *Izvestiya Akademii Nauk USSR. Seriya Geologicheskaya*. 1992. No. 11. pp. 147–153. (In Russ.)

4. Drebenshtedt K., Golik V.I., Dmitrak Yu.V. The prospects of diversification of technology of extraction of metals in Republic of North Ossetia–Alania. *Sustainable Development of Mountainous Territories*. 2018. Vol. 10. No. 1(35). pp. 125–131. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-1-125-131. (In Russ.)

5. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O., Nevsky L.N., Olkhovsky G.P., Tibilov S.M., Gogichev R.R. Optimisation of geophysical and geochemical criteria for prospecting deposits of known ore formations in the mountainous part of the Republic of North Ossetia–Alania. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2015. No. 3. pp. 28–62. (In Russ.)

6. Ivanov A.I., Chernykh A.I., Vartanyan S.S. Gold mineral base status and development prospects in the Russian Federation. *Otechestvennaya Geologiya*. 2018. No. 1. pp. 18–28. (In Russ.)

7. Kalmykov B.A., Levin F.D., Trusov A.A. The potential of modern aerogeophysical methods in the prediction and exploration of gold deposits. *Gold and Technology*. 2017. No. 2. pp. 76–82.

(In Russ.)

8. Nosyrev M.Yu. Geophysical characteristics of the Bamskoye gold deposit (Upper Amur region) and their application in the prediction and exploration of gold deposits. *Pacific Geology*. 2016. Vol. 35. No. 6. pp. 69–80. (In Russ.)

9. Parada S.G., Chotchaev Kh.O. Assessment of the potential gold content of ore-magmatic systems in the North Caucasus based on geophysical data. In: *Proc. of the IX All-Russian Sc. and Tech. Conf. Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus*. Moscow. ILET RAS. 2019. pp. 166–172. (In Russ.)

10. Shcherbakov Yu.G. Chemical evolution of the Earth's matter and endogenous ore formation. *Gold and Rare Elements in Geochemical Processes*. Novosibirsk. Nauka. 1976. pp. 14–33. (In Russ.)

11. Eirish L.V. Factors determining origination of gold ore systems in the Russian Far East. *Geology of Ore Deposits*. 2009. Vol. 51. No. 3. pp. 223–232. DOI: 10.1134/S1075701509030040.

12. Guangxi Z.Y., Pang B., Li Y., Lit J. The metallogenic regularities and metallogenic prognosis for the Xinping gold deposit in Pingnan County. *Geoscience*. 2016. Vol. 30. No. 4. pp. 770–780.

13. Hart C.J.R. Reduced intrusion-related gold systems. *Mineral deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division. Spec. Publ.* 2007. No. 5. pp. 95–112.

14. Kerr A.C., Lavis O., Kakar M.I., McDonald I. Petrogenesis and tectonomagmatic significance of Eocene mafic intrusions from the Neotethyan suture zone in the Muslim Bagh-Khanozai region. Pakistan. *Journal of the Geological Society*. 2016. Vol. 173. No. 3. pp. 2015–062. DOI: 10.1144/jgs2015-062.

15. Ma Xiao-lei, Yuan B., Xu W., Song I.J. et al. The relationship between features of gravity and magnetic field and sandstone-type uranium deposits in the south of Ordos basin. *Geology and Prospecting*. 2016. Vol. 52. No. 4. pp. 647–656.

16. Parada S.G., Stolyarov V.V., Popov Y.V. New type of gold mineralization of the Tyryauz ore cluster (Kabardino-Balkar republic). *Doklady Earth Sciences*. 2017. Vol. 477. No. 1. pp. 1256–1259. DOI: 10.1134/S1028334X17110058.

17. Root B.C., Ebbing J., van der Wal W., England R.I. et al. Comparing gravity-based to seismic-derived lithosphere densities a case study of the British Isles and surrounding areas. *Geophysical Journal International*. 2017. Vol. 208. No 3. pp. 1796–1810.

18. Safonov Yu.G. Hydrothermal gold deposits: distribution, geological-genetic types, and productivity of ore-forming systems. *Geology of Ore Deposits*. 1997. Vol. 39. No. 1. pp. 20–32.

19. Zurcher L., Dunlap P., Bookstrom A.A., Zientek M.L., Wallis J.C., Hammarstrom J.M., Mars J.C., Ludington S.D. Tectono-magmatic evolution of porphyry belts in the Central Tethys Region of Turkey, The Caucasus, Iran, Western Pakistan, And Southern Afghanistan. *Ore Geology Reviews*. 2019. Vol. 111. pp. 102849–102929. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.02.034.

УДК 550.8.013

DOI: 10.46698/VNC.2026.71.78.001

Оригинальная статья

Геофлюидодинамические особенности нефтегазонакопления глубокопогруженных горизонтов юга Бузулукской впадины

Л.И. Бондарева[✉], Л.А. Абукова[✉]

Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, Россия, 119333,
г. Москва, ул. Губкина, 3, e-mail: liana_abril@mail.ru

Статья поступила: 07.10.2025, доработана: 09.03.2026, принята к публикации: 13.03.2026

Резюме: Актуальность работы. Вовлечение в хозяйственный оборот углеводородного потенциала больших глубин является одним из ключевых направлений геологоразведочных работ, направленных на поиск крупных скоплений горючих ископаемых в мире. В России поиск крупных и уникальных нефтегазовых месторождений также рассматривается в числе ключевых стратегий освоения ресурсной базы углеводородов земных недр. **Цель работы** – уточнение прогноза в пределах нижнедевонско-нижнефранских подсолевых отложений ранее невыявленных зон нефтегазонакопления с учетом геофлюидодинамической обстановки. **Материалы и методы.** Для создания бассейновой модели использовались структурные карты по поверхности кристаллического фундамента, подошве карбонатного девона, кровле тульских отложений, кровле верейских отложений, поверхности палеозойских отложений, литолого-фациальные карты эмско-нижнефранских, фаменско-турнейских, среднефранских, косьвинско-радаевских, бобриковских отложений, а также дополнительно построенные 15 структурных карт, 25 литолого-фациальных карт и 5 геохимических карт с содержанием общего органического углерода и водородного индекса. Для калибровки модели использовались замеры пластовых давлений Южно-Первомайско – Западно-Степного участка по скважинам Западно-Степная 4, Южно-Первомайская 13, 15, 18. **Методология** исследования предусматривает систематизацию, интерпретацию и обработку геолого-геофизических материалов, характеризующих строение Бузулукской впадины Волго-Уральской провинции; она базируется на **методе** бассейнового моделирования, включающем построение структурного каркаса, реконструкцию процессов нефтегазообразования и нефтегазонакопления, и обязательную калибровку модели по результатам глубокого бурения. **Результаты** проведенной работы заключаются в повышении точности существующей трехмерной бассейновой модели исследуемого района путем интеграции дополнительного объема данных скважинных исследований. **Научная новизна** состоит в том, что в интервале разреза глубоководных отложений выявлена тенденция замещения компрессионного водонапорного режима на стагнационный. Это позволяет сформулировать гипотезу о возможности трансформации углеводородных систем из проточных в гидродинамически закрытые (автоклавные), в пределах которых процессы катагенной флюидогенерации растягиваются на значительные глубины, соответственно формируются глубокопогруженные зоны нефтегазонакопления. **Выводы.** В нижнедевонско-нижнефранских подсолевых отложениях южной части Бузулукской впадины выделены две прогнозные зоны нефтегазонакопления. При дальнейшей детализации термобарической и геохимической обстановок генерации и аккумуляции углеводородов в этих прогнозных зональных объектах повышена вероятность обнаружения ранее невыявленных нефтегазовых месторождений.

Ключевые слова: Бузулукская впадина, бассейновое моделирование, углеводородные системы, месторождения нефти и газа, глубокозалегающие горизонты, водонапорный режим.

Благодарности: Работа выполнена за счет госбюджетного финансирования НИР «Фундаментальный базис инновационных, цифровых технологий прогноза, поиска, разведки и освоения нефтегазовых ресурсов (фундаментальные, поисковые, прикладные, экономические и междисциплинарные исследования до 2030 г.)» (Рег. № FMME-2025-0012).

Для цитирования: Бондарева Л.И., Абукова Л.А. Геофлюидодинамические особенности нефтегазонакопления глубокопогруженных горизонтов юга Бузулукской впадины. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 142-153. DOI: 10.46698/VNC.2026.71.78.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.71.78.001

Original paper

Geo-fluidodynamic features of hydrocarbon accumulation in deep-seated horizons of the southern part of the Buzuluk Basin

L.I. Bondareva^{ORCID}, L.A. Abukova^{ORCID}

Institute of Oil and Gas Problems, Russian Academy of Sciences, 3 Gubkina Str., Moscow 119333, Russian Federation, e-mail: liana_bondareva@ipng.ru

Received: 07.10.2025, revised: 09.03.2026, accepted: 13.03.2026

Abstract: Relevance. Harnessing the hydrocarbon potential of deep-seated deposits is a key focus of geological exploration efforts aimed at finding large accumulations of fossil fuels worldwide. In Russia, the search for large and unique oil and gas fields is also considered a key strategy for developing the Earth's hydrocarbon resource base. **Aim.** The aim of the work is to refine the forecast within the Lower Devonian-Lower Frasnian subsalt deposits of previously undetected oil and gas accumulation zones, taking into account the geofluid-dynamic environment. **Materials and Methods.** To create the basin model, we used structural maps of the crystalline basement surface, the base of the Devonian carbonate, the top of the Tulsian deposits, the top of the Vereiskian deposits, the surface of Paleozoic deposits, lithofacies maps of the Emsian-Lower Frasnian, Famennian-Tournaisian, Middle Frasnian, Kosvinian-Radaevskian, and Bobrikovian deposits, as well as 15 additional structural maps, 25 lithofacies maps, and 5 geochemical maps with total organic carbon and hydrogen index contents. Reservoir pressure measurements from the Yuzhno-Pervomaysko-Zapadno-Stepnoy area in wells Zapadno-Stepnaya 4 and Yuzhno-Pervomayskaya 13, 15, and 18 were used to calibrate the model. The research **methodology** involves systematizing, interpreting, and processing geological and geophysical data characterizing the structure of the Buzuluk Depression in the Volga-Ural Province. It is based on basin modeling, which includes constructing a structural framework, reconstructing oil and gas formation and accumulation processes, and mandatory model calibration based on deep drilling data. **Results.** The results of the work include increasing the accuracy of the existing three-dimensional basin model of the study area by integrating additional volumes of borehole data. **Scientific novelty.** The scientific novelty lies in the discovery of a trend toward a stagnation-based regime replacing compressional aquifers within a deep-sea sediment section. This allows us to formulate a hypothesis regarding the possibility of hydrocarbon systems transforming from flow-through to hydrodynamically closed (autoclave) systems, within which catagenic fluid generation processes extend to significant depths, thus forming deep-sea oil and gas accumulation zones. **Conclusions.** Two predicted oil and gas accumulation zones have been identified in the Lower Devonian-Lower Frasnian subsalt deposits of the southern Buzuluk Depression. Further refinement of the thermobaric and geochemical conditions of hydrocarbon generation and accumulation in these predicted zonal features increases the likelihood of discovering previously undetected oil and gas fields.

Keywords: Buzuluk depression, basin modeling, hydrocarbon systems, oil and gas fields, deep-seated horizons.

Acknowledgments: The work was carried out using state budget funding for the research project "Fundamental foundations of economics, digital technologies for forecasting, prospecting, exploration and development of oil and gas resources (fundamental, prospecting, applied, economic and interdisciplinary research until 2030)" (registration No. FMME-2025-0012).

For citation: Bondareva L.I., Abukova L.A. Geo-fluidodynamic features of hydrocarbon accumulation in deep-seated horizons of the southern part of the Buzuluk Basin. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 142-153. DOI: 10.46698/VNC.2026.71.78.001

Введение

Одним из важнейших направлений геологоразведочных исследований, нацеленных на выявление крупных залежей горючих ископаемых в мировом масштабе, является активное освоение углеводородного потенциала глубоководных горизонтов [Волож и др., 2022; Мударисова, Лукьянова, 2025; Kuandykov et al., 2022; Li et al., 2022]. В России аналогичные задачи включены в число ключевых стратегий по разработке углеводородной ресурсной базы страны. Наша страна обладает большими перспективами обнаружения крупных и уникальных месторождений углеводородов (УВ). В числе таких объектов находится Бузулукская впадина, расположенная в Волго-Уральской провинции на территории Саратовской, Самарской и Оренбургской областей. В ее пределах при значительном этаже нефтегазоносности, особо важное значение в качестве приоритетного объекта разработки занимают девонские отложения, залегающие на глубинах порядка 4 км. Однако ранее проведенные исследования выявили неоднозначность интерпретации характера влияния геофлюидодинамических условий на процессы нефтегазоаккумуляции, в том числе и девонской части геологического разреза. Потому цель настоящей работы состоит в уточнении прогноза в пределах нижнедевонско-нижнефранских подсоловых отложений ранее невыявленных зон нефтегазоаккумуляции с учетом геофлюидодинамической обстановки. Достижение этой цели возможно благодаря развитию современных технологий бассейнового моделирования.

Методика и материалы исследований

Бассейновое моделирование – это компьютерная технология реконструкции геологической истории осадочного бассейна для прогноза его нефтегазоносности. В рамках детализации ранее разработанной модели [Бондарева, Попова, 2024], проведена ее калибровка с использованием данных из скважин, пробуренных в юго-западной (наиболее глубокой) части впадины. Метод калибровки модели дает возможность повысить достоверность модели путем минимизации разницы между реальными и их модельными значениями. Результат достигается тщательной настройкой модели на входные параметры, описывающие свойства горных пород, литологию, палеотемпературы, палеоглубины исследуемого объекта, тепловые потоки и т.д. [Alipour et al., 2021; He et al., 2021]. Так, для калибровки модели привлечены скважинные данные по пластовым давлениям эмско-нижнефранского нефтегазоносного комплекса Южно-Первомайско-Западно-Степного участка [Орешкин и др., 2015; Пятаев, 2016], в частности по скважинам Западно-Степная 4, Южно-Первомайская 13, 15, 18.

Обсуждение результатов

В пределах Бузулукской впадины осадочный чехол представлен преимущественно терригенно-карбонатными и сульфатно-галогенными толщами. Кунгурский комплекс, сложенный ангидритами и солями, функционирует как литологический барьер, разделяет разрез осадочного чехла на два региональных геофлюидодинамических этажа [Глянцев, 2010; Карцев и др., 1992].

В составе нижнего геофлюидодинамического этажа наиболее значимые перспективы нефтегазоносности связаны с эмско-нижнефранским нефтегазоносным комплексом. В его составе выделяются три подкомплекса: нижнедевонский (такатинско-койвенский), эйфельский (бийско-афонинский) и живетско-тиманский [Афанасьева, 2011; Пятаев, 2016; Фортунатова и др., 2022]. С севера на юг мощность эмско-ниж-

нефранского нефтегазоносного комплекса закономерно возрастает, изменяясь от 150–170 м до 500–590 м [Афанасьева, 2011].

В раннем девоне условия для накопления глубоководных осадков были наиболее благоприятны в южной части впадины, которая в настоящее время выделяется как Перелюбско-Рубежинский прогиб. Отложения нижнедевонского подкомплекса, имеют глинисто-песчаный состав [Фортунова и др., 2022]. В центральных и северных частях впадины отложения нижнедевонского подкомплекса встречаются редко или вовсе отсутствуют. Эмские отложения нижнедевонского подкомплекса, включающие аргиллиты (мощностью до 38 м) [Афанасьева, 2011] и другие глубоководные породы, могут выполнять функцию литологического барьера.

В эйфельское время в южной части впадины существовали условия, способствующие накоплению глубоководных пород – алевролитов, глинистых алевролитов, аргиллитов с прослоями известняков глубокого шельфа.

Глубоководная часть разреза живетско-тиманского подкомплекса эмско-нижнефранского нефтегазоносного комплекса представлена глинисто-кремнисто-карбонатными отложениями [Афанасьева, 2011; Фортунова и др., 2022], которые способны выполнять функции литологического барьера. Глинистая пачка живетско-тиманского подкомплекса состоит из аргиллитов, а также слоев алевролитов и известняков. В целом, эта глинистая пачка отличается высоким содержанием гидрослюд в глинах, однородной структурой и минимальной долей терригенной примеси, а также равномерным распределением микрозернистого кальцита, что указывает на её хорошие флюидоупорные свойства. Отложения живетско-тиманского подкомплекса ограничены по площади и встречаются в юго-западной и северо-западной частях Бузулукской впадины [Афанасьева, 2011; Фортунова и др., 2022].

С геофлюидодинамических позиций высокая степень глинизации эмско-нижнефранского нефтегазоносного комплекса может явиться основной причиной перехода компрессионного водонапорного режима в стагнационный. Этот процесс скорее всего носит локальный характер и имеет место только в южной части впадины.

Особого внимания заслуживает тот факт, что в юго-восточной части Бузулукской впадины (скважина Клиновская 2) темп роста пластового давления с глубиной оказался значительно ниже гидростатического [Орешкин и др., 2015; Пятаев, 2016]. Это указывает на возможное существование гидродинамической ловушки для нефти [Орешкин и др., 2015].

На основе фактических данных [Орешкин и др., 2015; Пятаев, 2016], обобщенных в виде типовых эпюр распределения приведенных давлений эмско-нижнефранского нефтегазоносного комплекса, можно предполагать различия в гидродинамических обстановках, характерных для данного района. По-видимому, здесь имеют место проявления гравитационно-конвекционного режима барогенерации (например, скв. 2 Клиновская), а также отмечено проявление компрессионного режима (на Западно-Степной площади) [Орешкин и др., 2015]. В скважинах 13, 15, 18 Южно-Первомайских на больших глубинах возможен переход компрессионного водонапорного режима в стагнационный.

На рисунке 1 изображены результаты калибровки по скважине Южно-Первомайская 15.

Геологическая обстановка, характеризующаяся некомпенсированным прогибанием, сыграла значительную роль в становлении гидродинамического режима Бузулукской впадины. Прогибание шло с непостоянной скоростью и перерывами, накладываясь на общую тенденцию моноклиналиного погружения пород в южном направлении.

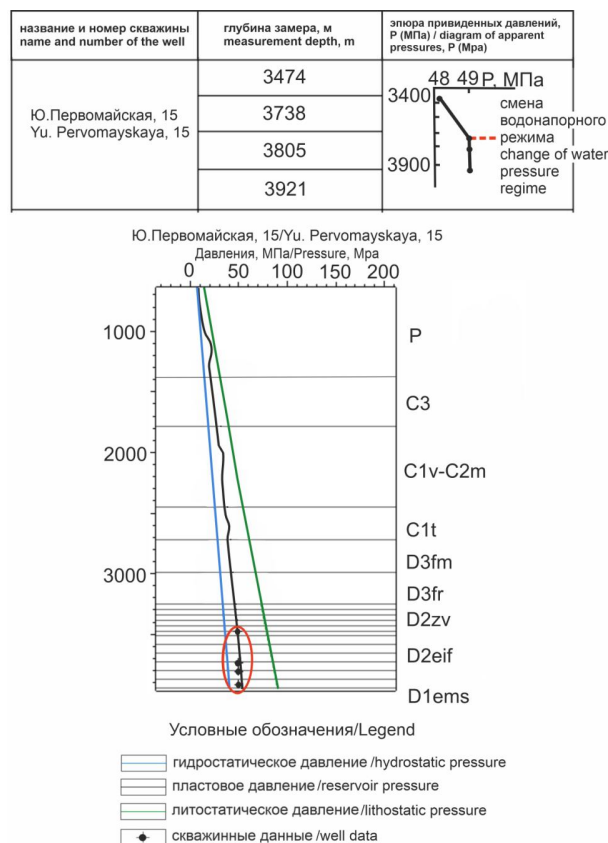


Рис. 1. Результаты калибровки модели по скв. Южно-Первомайская 15. Представленные на рисунке табличные данные по работам [Орешкин и др., 2015; Пятаев, 2016] с дополнениями /
Fig. 1. Results of model calibration for the Yuzhno-Pervomayskaya. The table data presented in the figure are from works [Oreshkin et al., 2015; Pyataev, 2016] with additions

По эпюрам давлений и литолого-стратиграфическим колонкам скв. Южно-Первомайская 15 [Пятаев, 2016], можно предполагать, что на глубине от 3400 до 3700 м залегает флюидоупор, способный эффективным образом, разобщать два комплекса с разными водонапорными режимами. Положение флюидоупора изменчиво, и в скважине Южно-Первомайская 18 он расположен выше 3300 м.

Важно отметить, что на большом фактографическом материале по нефтегазоносным бассейнам мира показано, что если углеводородные системы формируются в условиях развития гравитационного или компрессионного водонапорных режимов на сравнительно небольших глубинах (порядка 2–4 км), то они обладают свойствами проточных (квазиоткрытых) систем с пространственно развитой дренажной сетью, что обеспечивает отвод продуктов катагенной флюидогенерации из очагов нефтегазообразования в зоны нефтегазонакопления [Абукова и др., 2020; Попков, Попков, 2023; Toth, 2009].

В глубоких нефтегазоносных бассейнах в нижних геофлюидодинамических этапах, расположенных под регионально выдержанными соленосными толщами, на больших глубинах осадочного чехла возникают условия формирования стагнационного водонапорного режима [Jiang et al., 2011; Pang et al., 2022]. Такая гидродинамическая обстановка способствует тому, что проточные углеводородные системы трансформируются в гидродинамически закрытые (автоклавные). Им присуще: (1) пространственное совмещение процессов нефтегазообразования и нефтегазонакопления; (2) повышенная роль катагенетических преобразований собственного органического вещества; (3) постоянство гидродинамического потенциала во всей углеводо-

родной системе; (4) равенство поровых и пластовых давлений. В пределах таких систем скорость катагенетических процессов резко снижается, соответственно зона катагенетического превращения керогена в углеводороды нефтяного ряда смещается в область больших глубин, за счет чего здесь могут формироваться крупные и уникальные месторождения УВ, в том числе и в синклиналичных условиях [Li et al., 2021; Hua et al., 2025].

Определение пространственного расположения закрытой (автоклавной) УВС требует последовательного выполнения следующих задач: (1) выделение в разрезе регионального (доминантного) флюидопора, обеспечивающего гидродинамическую изоляцию нижнего геофлюидодинамического этажа, ниже которого развиты компрессионный и стагнационный водонапорные режимы; (2) установление характера распределения по площади и пространству пластовых давлений, локализация зон проявления пониженных значений гидродинамического потенциала, рассматриваемых как потенциальные зоны нефтегазонакопления [Абукова и др., 2020; Попков, Попков, 2023]. Учет этого механизма является методологической основой поиска залежей углеводородов на больших глубинах в нижних этажах нефтегазоносных бассейнов. Он и был реконструирован инструментами бассейнового моделирования применительно к Бузулукской впадине.

В результате выявления положений УВС по результатам моделирования, установлено, что степень трансформации (выработанности керогена) органического вещества эмских нефтегазоматеринских толщ (НГМТ) на юге впадины составила 80–100% (3200–6500 м глубина залегания) (рис. 2). Остаточный генерационный потенциал равен 20 %. Основной очаг генерации углеводородных (УВ) газов (3600–6500 м) расположен на юге Бузулукской впадины, нефтегенерации – на севере впадины (2900–3600 м) [Бондарева, Попова, 2024; Мухин, 2011].

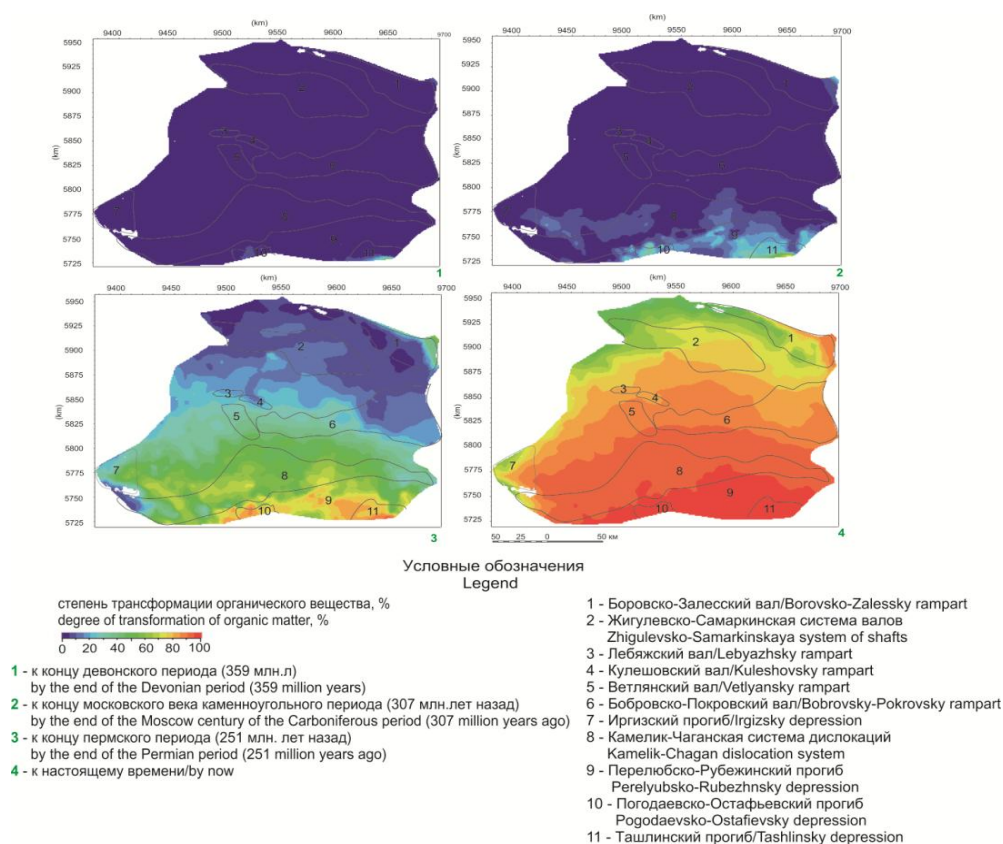


Рис. 2. Эволюция степени трансформации органического вещества эмских НГМТ /
Fig. 2. Evolution of the degree of transformation of organic matter of the Emskian oil
and gas source strata

В пространственном отношении в пределах нижнего геофлюидодинамического этажа были выделены две предполагаемые зоны развития стагнационного режима, в их пределах прогнозируется развитие автоклавных УВС. Также на основе палеотектонического анализа можно предположить, ранее эти отдельные блоки были больше по площади и составляли единый очаг нефтегазообразования в пределах единой автоклавной углеводородной системы.

В ходе переформирования структурного плана, сформировалась Камелиг-Чаганская система дислокаций, что привело к обособлению Перелюбско-Рубежинского и Иргизского прогибов (рис. 3), области размыва флюидоупоров стали потенциальными зонами разгрузки избыточных давлений.

Для более точного прогноза условий формирования автоклавной углеводородной системы в пределах рассматриваемой территории необходимо обосновать более детальные палеогеографические модели, требующие большого объема исходной информации.

Уточнение времени формирования автоклавных систем и денудационно-эрозионных процессов является также ключевой задачей исследований. На сегодня можно указать на то, что в Бузулукской впадине эрозионные процессы происходили перманентно: в девонское время (локально), в визее проявляли себя региональные размывы, и в современное время фиксируется денудация. Как можно судить по ряду примеров, смена геодинамических режимов нередко приводит к смене типов водонапорных систем, классическим примером чего является геофлюидодинамическая эволюция бассейна Сунляо [Chen et al., 2025; Hua et al., 2025].

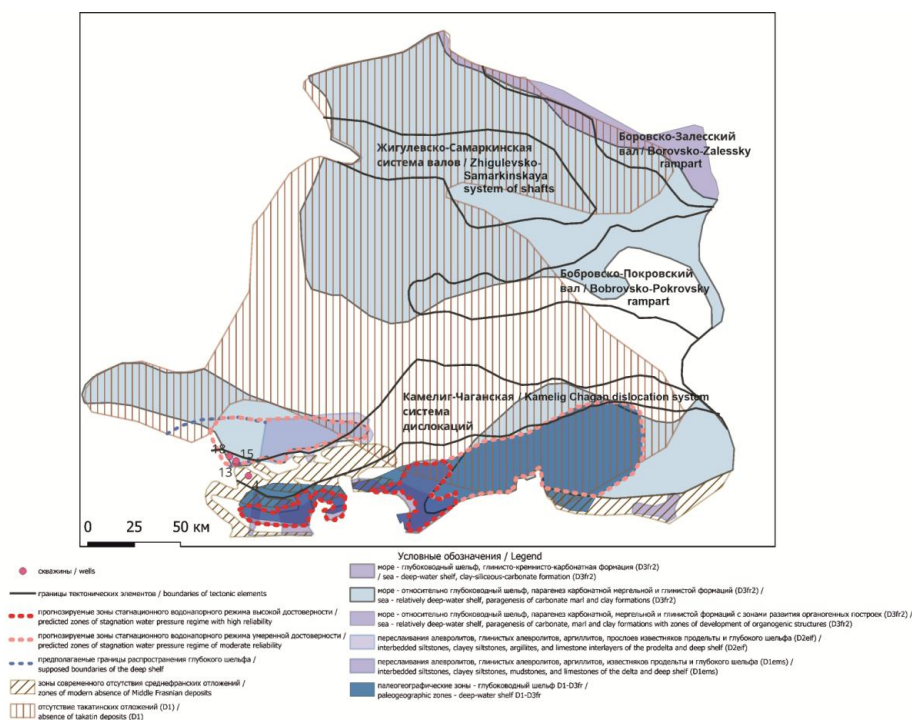


Рис. 3. Схема зон распространения прогнозных УВС автоклавного типа, по которым есть признаки формирования стагнационного водонапорного режима в пределах Бузулукской впадины /
Fig. 3. Diagram of the distribution zones of predicted autoclave-type hydrocarbon systems, which show signs of the formation of a stagnation water-pressure regime within the Buzuluk Depression

На основании актуализации модели были уточнены зоны распространения глубоководных отложений эмско-нижнефранского нефтегазоносного комплекса (рис. 4).

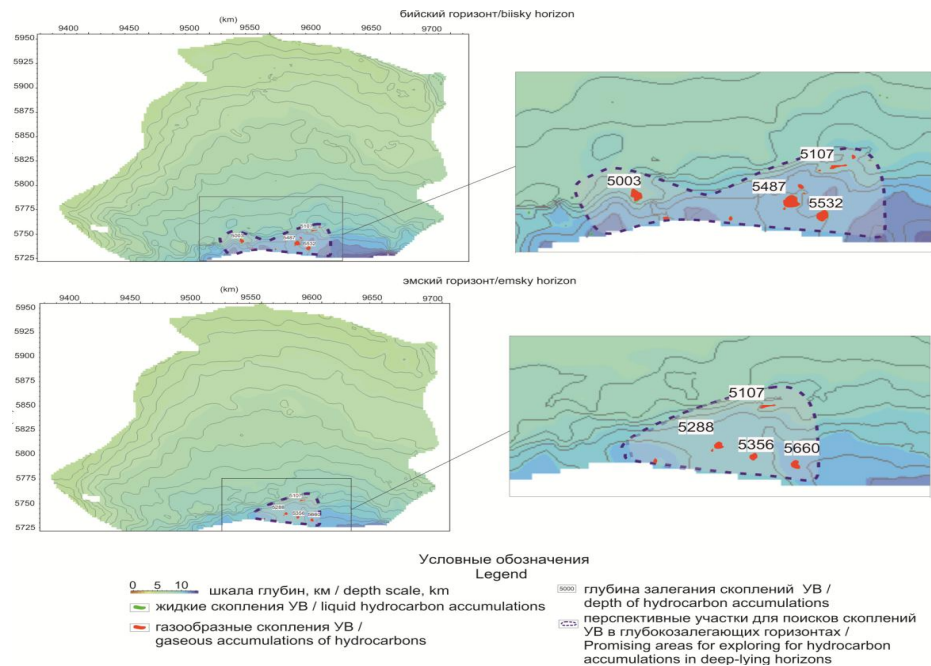


Рис. 4. Схема перспектив нефтегазоносности глубокозалегающих горизонтов Бузулукской впадины /
Fig. 4. Scheme of oil and gas potential prospects of deep-lying horizons of the Buzuluk Depression

По материалам разнородного геолого-геофизического материала и актуализации бассейновой модели были выделены нижеперечисленные предпосылки нефтегазоносности юга Бузулукской впадины.

Таблица 1 / Table 1

Предпосылки нефтегазоносности эмско-нижнефранского НГК Бузулукской впадины / Prerequisites for the oil and gas potential of the Emsian-Lower Frasnian oil and gas field of the Buzuluk depression

Стратиграфия продуктивных толщ/ Stratigraphy of productive strata	Эмский ярус / Emsian Stage	Эйфельский и живетский ярусы / Eifel and Givetian Stages
Характеристика НГМТ/ Characteristics of NGMT	Наличие богатых НГМТ с II типом керогена. Стадия катагенеза МК4–МК5 [Бондарева, Попова, 2024]. The presence of rich NGMT with type II kerogen. Catagenesis stage МК4–МК5 [Bondareva, Popova, 2024].	Наличие богатых НГМТ с II типом керогена. Стадия катагенеза МК4–МК5 [Бондарева, Попова, 2024]. / The presence of rich NGMT with type II kerogen. Catagenesis stage МК4–МК5 [Bondareva, Popova, 2024].
Литологическая характеристика коллекторов / Lithological characteristics of reservoirs	Осадочные породы койвенского и бийского горизонтов терригенного происхождения (песчаники) и карбонатные породы со вторичной пористостью и трещиноватостью. / Sedimentary rocks Koyvensky and Biysk horizons of terrigenous origin (sandstones) and carbonate rocks with secondary porosity and fracturing.	Высокопроницаемые и емкие песчаники воробьевского, ардатовского и муллинского горизонтов (эйфель, живет). Карбонатные породы афонинского горизонта со вторичной пористостью и трещиноватостью. / Highly permeable and capacious sandstones of the Vorobyovsky, Ardatovsky, and Mullinsky horizons (Eifelian, Givetian). Carbonate rocks of the Afoninsky horizon with secondary porosity and fracturing.

Характеристика флюидоупоров / Characteristics of fluid seals	«Удовлетворительные» флюидоупоры (небольшая площадь распространения, плохая сортировка обломочного материала глинистых толщ), локально однако глинистые толщи имеют монокластический состав, что обуславливает возможность их уплотнения [Афанасьева, 2011; Бондарева, Попова, 2024]. / “Satisfactory” fluid seals (small area of distribution, poor sorting of clastic material of clay strata); however, locally the clay strata have a monoclastic composition, which makes it possible to compact them [Afanasyeva, 2011; Bondareva, Popova, 2024].	Аргиллитовые пачки и глинисто-карбонатные толщи франского яруса [Афанасьева, 2011; Бондарева, Попова, 2024]. / Argillite packs and thick clay-carbonate strata of the Frasnian stage [Afanasyeva, 2011; Bondareva, Popova, 2024].
Характеристика ловушек / Characteristics of traps	Структурно-литологического, тектонически-экранированного и стратиграфического классов [Бондарева, Осипов, 2023; Бондарева, Попова, 2024]. / Structural-lithological, tectonic-screened and stratigraphic classes [Bondareva, Osipov, 2023; Bondareva, Popova, 2024].	Структурно-литологического и стратиграфического классов [Бондарева, Осипов, 2023; Бондарева, Попова, 2024]. / Structural-lithological and stratigraphic classes [Bondareva, Osipov, 2023; Bondareva, Popova, 2024].
Гидрогеология / Hydrogeology	Гидрогеологическая закрытость как фактор сохранности. Авторы предполагают распространение зон стагнационного режима под мощными толщами вышележащего девона. / Hydrogeological closure as a preservation factor. The authors suggest the distribution of stagnation zones beneath thick strata of the overlying Devonian.	Авторы предполагают формирование «автоклавных» систем: В условиях гидродинамической стагнации формируется особый автоклавный тип углеводородных систем. / The authors suggest the formation of “autoclave” systems: Under conditions of hydrodynamic stagnation, a special autoclave type of hydrocarbon systems is formed.
Нефтегазоносность / Oil and gas potential	Признаки нефтегазоносности в эмских отложениях на смежных территориях Оренбургской области, где в керне отмечены трещины, заполненные битумом, встречаются интервалы с выпотами нефти. / Signs of oil and gas potential have been noted in the Emsian deposits in adjacent territories of the Orenburg region, where cracks filled with bitumen have been noted in the core, and intervals with oil effusions are found.	Промышленные нефтеносные горизонты на Западно-Вишневской площади, Куцебовском, Зайкинско-Зоринском, Сахаровском, Гаршинском, Росташинском, Конновском, Северо-Флеровском и др. месторождениях. / Industrial oil-bearing horizons in the Zapadno-Vishnevskaya area, Kutsebovskoye, Zaikinsko-Zorinskoye, Sakharovskoye, Garshinskoye, Rostashinskoye, Konnovskoye, Severo-Flerovskoye and other fields.

Заключение

Выполнено многовариантное бассейновое моделирование процессов нефтегазообразования и нефтегазонакопления в эмско-нижнефранском комплексе Бузулукской впадины. На основе литолого-фациального и геофлюидодинамического анализа выделены 2 вертикальных геофлюидодинамических этажа: нижний – нижнедевонско-нижнефранский (стагнационный), верхний – нижнефранско-пермский (эллизионный). На основе анализа имеющегося геологического материала предложена гипотеза о формировании в пределах подсолевой части разреза стагнационного во-

донапорного режима, контролирующего распространение углеводородной системы автоклавного типа.

Научная значимость прогноза развития в Бузулукской впадине автоклавной УВС заключается в повышении достоверности механизмов формирования и сохранения залежей углеводородов на больших глубинах (нижний девон, эмский ярус). В условиях стагнационного режима возможно сохранение крупных нефтегазовых залежей, что имеет важное значение для эффективного освоения ресурсной углеводородной базы в старых нефтедобывающих регионах, к числу которых относится и Волго-Уральская провинция. Полученные в ходе данного исследования результаты служат основой для дополнительных научных изысканий, необходимых для подтверждения предложенной модели аккумуляции УВ в Бузулукской впадине на нескрытых бурением глубинах.

Литература

1. Абукова Л.А., Селиверстова М.Е., Исаева Г.Ю. Роль водонапорных систем древних осадочных бассейнов в процессах нефтегазоаккумуляции. // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2020. – № 4(31). – С. 14–24. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2020-31.art2.
2. Афанасьева М.А. Геологическое строение и перспективы открытия новых месторождений нефти и газа в девонских отложениях Бузулукской впадины: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.12 / Афанасьева Мария Александровна. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2011. – 173 с.
3. Бондарева Л.И., Осипов А.В. Формирование и размещение ловушек нефти и газа в пределах зоны сочленения Предуральского прогиба и Западно-Уральской внешней зоны складчатости. // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2023. – Т. 65. № 3. – С. 52–65. DOI: 10.32454/0016-7762-2023-65-3-52-65.
4. Бондарева Л.И., Попова М.К.А. Перспективы нефтегазоносности палеозойских отложений Бузулукской впадины Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2024. – № 12(396). – С. 17–22.
5. Волож Ю.А., Абукова Л.А., Рыбальченко В.В., Меркулов О.И. Формирование месторождений нефти и газа в глубоководных углеводородных системах: на пути к универсальной поисковой концепции. // Геотектоника. – 2022. – № 5. – С. 27–49. DOI: 10.31857/S0016853X22050095.
6. Глянцев А.В. Водонапорная гидрогеологическая система и её трансформация при разработке месторождений нефти и газа: на примере Бузулукской впадины: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.07 / Глянцев Алексей Васильевич. – Пермь: ОНЦ УрО РАН, 2010. – 130 с.
7. Карцев А.А., Вагин С.Б., Шугрин В.П. Нефтегазовая гидрогеология. М.: Недра, 1992. – 208 с.
8. Мударисова Р.А., Лукьянова Р.Г. Методика прогноза и поисков карбонатных резервуаров сверхвязкой нефти казанского яруса Мелекесской впадины. // Геология и Геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 4. – С. 137–149. DOI: 10.46698/h5492-0913-2863-p.
9. Мухин В.М. Связь нефтегазоносности и катагенеза пород Бузулукской впадины. // Геология, география и глобальная энергия. – 2011. – № 3(42). – С. 41–44.
10. Орешкин И.В., Постнова Е.В., Пятаев А.А. Качественная оценка фазового состояния углеводородных смесей и геотермобарические условия нефтегазоаккумуляции средне-верхнедевонского нефтегазового комплекса в юго-западной части Бузулукской впадины (Саратовская часть). // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. – 2015. – Т. 15. – № 1. – С. 45–55.
11. Попков В.И., Попков И.В. О сохранении поровых коллекторов в нижней части разреза нефтегазоносных отложений триаса Скифско-Туранской платформы. // Геология и Геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 106–117. DOI: 10.46698/VNC.2023.10.85.009.
12. Пятаев А.А. Прогноз нефтегазоносности и перспективы поисков залежей нефти и газа в девонских отложениях юго-западной части Бузулукской впадины: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.12 / Пятаев Александр Алексеевич. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2016. – 172 с.

13. Фортунатова Н.К., Канев А.С., Ермолова Т.Е., Бушуева М.А., Михеева А.И. и др. Перспективы нефтегазоносности палеозойских отложений прибортовой зоны сочленения Прикаспийской и Волго-Уральской нефтегазоносных провинций. // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2022. – Т. 17. № 4. – 76 с. DOI: 10.17353/2070-5379/42_2022.
14. Alipour M., Alizadeh B., Mirzaie S. et al. Basin and petroleum system analysis in the southeastern Persian Gulf basin: a 2D basin modeling approach. // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2021. – Vol. 11. – pp. 4201–4214. DOI: 10.1007/s13202-021-01310-2.
15. Chen H., Zhang F., Jiang Q., Liu H., Sun L., Liu G. Overpressure-generating mechanism and its evolution characteristics of Cretaceous Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression–Songliao Basin. // *Lithologic Reservoirs*. – 2025. – Vol. 37. Issue 1. – pp. 102–114. DOI: CN/10.12108/xyqc.20250109.
16. He Z.L., Ma Y.S., Zhu D.Y., Duan T.Z., Geng J.H., Zhang J.T. et al. Theoretical and technological progress and research direction of deep and ultra-deep carbonate reservoirs. // *Oil Gas Geology*. – 2021. – Vol. 42. No. 3. – pp. 533–546.
17. Hua S., Jia H., Guang Y., Liang Y., Mingli S., Kesi Y., Yunhe W. Accumulation characteristics and exploration potential of tight oil and gas in southern Songliao Basin. // *Acta Petrolei Sinica*. – 2025. – Vol. 46. Issue 1. – pp. 61–76. DOI: 10.7623/syxb202501005.
18. Jiang X.W., Wang X.S., Wan L., Ge S. An analytical study on stagnant points in nested flow systems in basins with depth-decaying hydraulic conductivity. // *Water Resources*. – 2011. – No. 47. DOI: 10.1029/2010WR00934P6.
19. Kuandykov B.M., Syngaevsky P., Hafizov S. H. Formation and preservation of reservoirs at great depth. // *Kazakhstan Journal for Oil and Gas Industry*. – 2022. – Vol. 4. Issue 2. – pp. 11–26. DOI: 10.54859/kjogi100605.
20. Li M.P., Chen Z.H., Yi S.W., Lin S.G., Gao Y., Huang F.X., She Y.Q., Qiao R.Z. Origin and accumulation mechanisms of deep paleozoic oil and gas: A case study of the central Tarim Basin, Western China. // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – p. 208. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.10963.
21. Li W., Chen Z., Huang P., Yu Z., Min L., Lu X. Formation of overpressure system and its relationship with the distribution of large gas fields in typical foreland basins in central and western China. // *Petroleum Exploration and Development*. – 2021. – Issue 3. – pp. 625–640. DOI: 10.1016/S1876-3804(21)60050-2.
22. Pang X.Q., Hu T., Larter S., Jiang Z.X., Li M.W., Wu L.Y. et al. Hydrocarbon accumulation depth limit and implications for potential resources prediction. // *Gondwana Research*. – 2022. – Vol. 103. – pp. 389–400. DOI: 10.1016/j.gr.2021.10.018.
23. Toth J. Gravitational systems of groundwater flow: theory, evaluation, utilization. UK: Cambridge University Press, 2009. – pp. 311.

References

1. Abukova L.A., Seliverstova M.E., Isaeva G.Yu. The role of aquifer systems of ancient sedimentary basins in oil and gas accumulation processes. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2020. No. 4(31). pp. 14–24. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2020-31.art2. (In Russ.)
2. Afanasyeva M.A. Geological structure and prospects for the discovery of new oil and gas fields in the Devonian deposits of the Buzuluk Depression. Candidate dissertation 25.00.12. Moscow. 2011. 174 p. (In Russ.)
3. Bondareva L.I., Osipov A.V. Formation and placement of oil and gas traps within the junction zone of the Cis-Ural trough and the West Ural external folding zone. *News of Higher Educational Institutions. Geology and Exploration*. 2023. Vol. 65. No. 3. pp. 52–65. DOI: 10.32454/0016-7762-2023-65-3-52-65. (In Russ.)
4. Bondareva L.I., Popova M.K.A. Prospects for oil and gas potential of Paleozoic deposits of the Buzuluk depression of the Volga-Ural oil and gas province. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2024. No. 12(396). pp. 17–22. (In Russ.)
5. Volozh Yu.A., Abukova L.A., Rybalchenko V.V., Merkulov O.I. Formation of oil and gas fields in deep hydrocarbon systems: outline of a universal search concept. *Geotectonics*. 2022. Vol. 56. No. 5. pp. 586–606. (In Russ.)
6. Glyancev A.V. Water-pressure hydrogeological system and its transformation during the

development of oil and gas fields: on the example of the Buzuluk depression. Candidate dissertation 25.00.07. Perm. 2010. 130 p. (In Russ.)

7. Kartsev A.A., Vagin S.B., Shugrin V.P. Oil and Gas Hydrogeology. Moscow. Nedra. 1992. 208 p. (In Russ.)

8. Mudarisova R.A., Lukyanova R.G. Searching and exploration methodology for carbonate reservoirs of the Kazanian Stage ultraviscous oil the Melekess Depression. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 4. pp. 137–149. DOI: 10.46698/h5492-0913-2863-p. (In Russ.)

9. Mukhin V.M. Relationship between oil and gas potential and catagenesis of rocks of the Buzuluk depression. *Geology, Geography and Global Energy*. 2011. No. 3(42). pp. 41–44. (In Russ.)

10. Oreshkin I.V., Postnova E.V., Pyataev A.A. Qualitative assessment of the phase state of hydrocarbon mixtures and geothermobaric conditions of oil and gas accumulation of the Middle-Upper Devonian oil and gas complex in the southwestern part of the Buzuluk depression (Saratov part). *Bulletin of the Saratov University. New Series. Earth Sciences Series*. 2015. Vol. 15. No. 1. pp. 45–55. (In Russ.)

11. Popkov V.I., Popkov I.V. On the preservation of pore reservoirs in the lower part of the section of oil and gas deposits of the Triassic Scythian-Turanian platform. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 106–117. DOI: 10.46698/VNC.2023.10.85.009. (In Russ.)

12. Pyataev A.A. Forecast of oil and gas potential and prospects for oil and gas deposits in Devonian deposits of the southwestern part of the Buzuluk depression. Candidate dissertation 25.00.12. Moscow. 2016. 172 p. (In Russ.)

13. Fortunatova N.K., Kanev A.S., Ermolova T.E., Bushueva M.A., Mikheeva A.I. et al. Prospects for the oil and gas potential of Paleozoic sediments of the near-wall zone of the junction of the Caspian and Volga-Ural oil and gas provinces. *Oil and Gas Geology. Theory and Practice*. 2022. Vol. 17. No. 4. 76 p. DOI: 10.17353/2070-5379/42_2022. (In Russ.)

14. Alipour M., Alizadeh B., Mirzaie S. et al. Basin and petroleum system analysis in the southeastern Persian Gulf basin: a 2D basin modeling approach. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2021. Vol. 11. pp. 4201–4214. DOI: 10.1007/s13202-021-01310-2.

15. Chen H., Zang F., Jiang Q., Liu H., Sun L., Liu G. Overpressure-generating mechanism and its evolution characteristics of Cretaceous Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression–Songliao Basin. *Lithologic Reservoirs*. 2025. Vol. 37. Issue 1. pp. 102–114. DOI: CN/10.12108/xyqc.20250109.

16. He Z.L., Ma Y.S., Zhu D.Y., Duan T.Z., Geng J.H., Zhang J.T. et al. Theoretical and technological progress and research direction of deep and ultra-deep carbonate reservoirs. *Oil Gas Geology*. 2021. Vol. 42. No. 3. pp. 533–546.

17. Hua S., Jia H., Guang Y., Liang Y., Mingli S., Kesi Y., Yunhe W. Accumulation characteristics and exploration potential of tight oil and gas in southern Songliao Basin. *Acta Petrolei Sinica*. 2025. Vol. 46. Issue 1. pp. 61–76. DOI: 10.7623/syxb202501005.

18. Jiang X.W., Wang X.S., Wan L., Ge S. An analytical study on stagnant points in nested flow systems in basins with depth-decaying hydraulic conductivity. *Water Resources*. 2011. No. 47. DOI: 10.1029/2010WR00934P6.

19. Kuandykov B.M., Syngaevsky P., Hafizov S. H. Formation and preservation of reservoirs at great depth. *Kazakhstan Journal for Oil and Gas Industry*. 2022. Vol. 4. Issue 2. pp. 11–26. DOI: 10.54859/kjogi100605.

20. Li M.P., Chen Z.H., Yi S.W., Lin S.G., Gao Y., Huang F.X., She Y.Q., Qiao R.Z. Origin and accumulation mechanisms of deep paleozoic oil and gas: A case study of the central Tarim Basin, Western China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. p. 208. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.10963.

21. Li W., Chen Z., Huang P., Yu Z., Min L., Lu X. Formation of overpressure system and its relationship with the distribution of large gas fields in typical foreland basins in central and western China. *Petroleum Exploration and Development*. 2021. Issue 3. pp. 625–640. DOI: 10.1016/S1876-3804(21)60050-2.

22. Pang X.Q., Hu T., Larter S., Jiang Z.X., Li M.W., Wu L.Y. et al. Hydrocarbon accumulation depth limit and implications for potential resources prediction. *Gondwana Research*. 2022. Vol. 103. pp. 389–400. DOI: 10.1016/j.gr.2021.10.018.

23. Toth J. Gravitational systems of groundwater flow: theory, evaluation, utilization. UK. Cambridge University Press. 2009. pp. 311.

УДК 532.546

DOI: 10.46698/VNC.2026.36.15.001

Оригинальная статья

Определение параметров зоны нарушения фильтрационных свойств пласта по данным термогидродинамических исследований

А.Ш. Рамазанов[✉], Ф.Ф. Давлетшин[✉], Д.Ф. Исламов[✉], Р.З. Акчурин[✉]

Уфимский университет науки и технологии, Россия, 450076, г. Уфа,
ул. 3. Валиди, 32, e-mail: felix8047@mail.ru

Статья поступила: 25.08.2025, доработана: 06.02.2026, принята к публикации: 09.02.2026

Резюме: Актуальность работы. Оценка параметров прискважинной зоны пласта (ПЗП), таких как радиус и проницаемость зоны нарушения фильтрационных свойств, является ключевой задачей для планирования и контроля эффективности геолого-технических мероприятий. Существующие методы диагностики имеют ограничения, особенно в широко распространенных на практике условиях двухфазной (нефть-вода) фильтрации. Классические подходы, разработанные для однофазной среды, требуют адаптации и валидации для более сложных многофазных систем. **Цель.** Разработка и апробация простой и физически обоснованной методики для последовательного определения радиуса и проницаемости зоны нарушения в ПЗП по данным нестационарной термометрии при двухфазной фильтрации нефти и воды. **Объект и методы.** Объектом исследования является процесс неизотермической двухфазной фильтрации в пласте с радиальной неоднородностью. Методологической основой работы является новое аналитическое решение для нестационарного температурного поля, учитывающее термодинамические эффекты. Методика интерпретации основана на билинейной аппроксимации диагностического графика температуры в полулогарифмических координатах и нахождении точки пересечения линейных трендов, соответствующих фильтрации в нарушенной и ненарушенной зонах пласта. Апробация методики проведена путем сравнения ее результатов с данными численного моделирования в Ansys. **Результаты.** Разработана пошаговая методика, позволяющая последовательно определять проницаемость и радиус нарушенной зоны в ПЗП. Показано, что время прихода теплового сигнала от границы зон определяется по точке пересечения аппроксимирующих прямых, что позволяет вычислить радиус зоны нарушения. Проницаемости зон определяются по тангенсам углов наклона этих прямых. Численный эксперимент подтвердил высокую точность методики: погрешность определения радиуса зоны нарушения составила 1.4 %, а проницаемостей – менее 8 %. Установлено, что небольшая погрешность обусловлена физическими эффектами (теплопроводность, сжимаемость), не учтенными в аналитической модели. **Выводы.** Разработанная методика является эффективным инструментом для экспресс-диагностики состояния ПЗП, применимым в практических условиях двухфазного потока.

Ключевые слова: двухфазная фильтрация, прискважинная зона пласта, термометрия, аналитическое решение, логарифмическая производная, проницаемость, радиус зоны нарушения, термогидродинамические исследования.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по теме: «Создание теоретических основ новой технологии диагностики неоднородных пластов при многофазном потоке с учетом термогидродинамических эффектов» (проект № 25-29-00803).

Для цитирования: Рамазанов А.Ш., Давлетшин Ф.Ф., Исламов Д.Ф., Акчурин Р.З. Определение параметров зоны нарушения фильтрационных свойств пласта по данным термогидродинамических исследований. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 154-167. DOI: 10.46698/VNC.2026.36.15.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.36.15.001

Original paper

Determination of parameters of the zone of impaired reservoir permeability based on thermal hydrodynamic studies

A.Sh. Ramazanov[✉], F.F. Davletshin[✉], D.F. Islamov[✉], R.Z. Akchurin[✉]

Ufa University of Science and Technology, 32 Z. Validi Str., Ufa 450076,
Russian Federation, e-mail: felix8047@mail.ru

Received: 25.08.2025, revised: 06.02.2026, accepted: 09.02.2026

Abstract: Relevance. Evaluation of near-wellbore zone (NWZ) parameters, such as radius and permeability of the filtration property disturbance zone, is a key task for planning and monitoring the efficiency of geological and technical measures. Existing diagnostic methods have limitations, especially under widely used conditions of two-phase (oil-water) filtration. Classical approaches developed for a single-phase medium require adaptation and validation for more complex multiphase systems. **Aim.** Development and testing of a simple and physically sound technique for sequential determination of the radius and permeability of the disturbance zone in the NWZ based on non-stationary thermometry data during two-phase oil and water filtration. **Object and methods.** The object of the study is the process of non-isothermal two-phase filtration in a formation with radial heterogeneity. The methodological basis of the work is a new analytical solution for a non-stationary temperature field that takes into account thermodynamic effects. The interpretation technique is based on the bilinear approximation of the diagnostic temperature graph in semi-logarithmic coordinates and finding the intersection point of the linear trends corresponding to filtration in the disturbed and undisturbed formation zones. The technique was tested by comparing its results with the data of numerical modeling in Ansys. **Results.** A step-by-step technique has been developed that allows sequentially determining the permeability and radius of the disturbed zone in the NWZ. It is shown that the time of arrival of the thermal signal from the zone boundary is determined by the intersection point of the approximating lines, which allows calculating the radius of the disturbed zone. The permeabilities of the zones are determined by the tangents of the angles of inclination of these lines. A numerical experiment confirmed the high accuracy of the technique: the error in determining the radius of the disturbed zone was 1.4 %, and the permeabilities were less than 8 %. It was found that a small error is due to physical effects (thermal conductivity, compressibility) not taken into account in the analytical model. **Conclusions.** The developed technique is an effective tool for express diagnostics of the state of the NWZ, applicable in practical conditions of two-phase flow.

Keywords: two-phase filtration, near-wellbore zone, thermometry, analytical solution, logarithmic derivative, permeability, radius of disturbance zone, thermohydrodynamic studies.

Acknowledgments: The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation on the topic: "Creation of theoretical foundations for a new technology for diagnosing heterogeneous formations with a multiphase flow taking into account thermohydrodynamic effects" (project No. 25-29-00803).

For citation: Ramazanov A.Sh., Davletshin F.F., Islamov D.F., Akchurin R.Z. Determination of parameters of the zone of impaired reservoir permeability based on thermal hydrodynamic studies. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 154-167. DOI: 10.46698/VNC.2026.36.15.001

Введение

Эффективность разработки нефтегазовых месторождений напрямую зависит от продуктивности пластов, причем продуктивность определяется не только проницаемостью коллектора, но и фильтрационно-емкостными свойствами прискважинной зоны. Проблема деградации прискважинной зоны пласта (ПЗП) вследствие естественных процессов, таких как кольматация вследствие отложения солей, асфальтенов, смол и парафинов, особенно остра для месторождений, находящихся на поздних стадиях разработки, включая сложные газоконденсатные объекты Северного Кавказа [Гасумов, 2016]. К этому естественному ухудшению может добавиться значительный техногенный ущерб: в частности, некорректный выбор жидкостей глушения при проведении капитального ремонта приводит к необратимому загрязнению порового пространства и дополнительному снижению продуктивности [Гасумов, Гасумов, 2025]. Для борьбы с ухудшением фильтрационных характеристик ПЗП применяются различные методы интенсификации притока [Anikin et al., 2022], эффективность которых напрямую зависит от точной диагностики параметров нарушенной зоны.

Традиционные методы оценки состояния ПЗП, такие как гидродинамические исследования скважин (ГДИ), позволяют определить интегральный скин-фактор, но не дают возможности разделить его на составляющие, связанные с геометрией и фильтрационными свойствами зоны нарушения [Bourdet, 2002; Давлетбаев и др., 2023]. В результате снижается эффективность планирования и оптимизации работ по интенсификации притока [Ситдииков, 2023].

Одним из наиболее перспективных подходов является термогидродинамическое зондирование, основанное на анализе динамики забойной температуры. Информативность метода базируется на проявлении термодинамических эффектов (в первую очередь, эффекта Джоуля-Томсона), интенсивность которых напрямую связана с градиентом давления и, следовательно, с проницаемостью зондируемого участка среды [Чекалюк, 1965]. Основы метода для однофазной фильтрации были развиты в ряде работ, где были предложены аналитические и численные подходы для определения параметров ПЗП при однофазной фильтрации жидкости [Рамазанов, Исламов, 2017; Duru, Horne, 2011; Исламов, Рамазанов, 2022]. Особую популярность приобрел анализ логарифмической производной температуры, позволяющий по характерным точкам на кривой оценивать границы зон с различной проницаемостью [Panini, Onur, 2018].

Тем не менее, подавляющее большинство месторождений разрабатывается в условиях двухфазной (нефть-вода) или многофазной (газ-нефть-вода) фильтрации. Этот факт значительно усложняет интерпретацию, так как теплофизические и гидродинамические свойства отдельных фаз потока сильно различаются. Численные исследования подтвердили принципиальную чувствительность температурного поля к параметрам ПЗП при многофазной фильтрации газ-нефть [Гайдуков и др., 2016; Sharafutdinov et al., 2017]. Однако практическое применение этих результатов затруднено из-за отсутствия простой и надежной методики интерпретации промысловых данных.

Современные исследования активно используют данные распределенных оптоволоконных систем (DTS/DAS) для мониторинга. Основной фокус этих работ направлен на диагностику проблем вдоль ствола скважины, таких как обнаружение утечек и оценка целостности конструкции [Noble et al., 2021; Cherubini et al., 2023], а также на количественную оценку профилей притока и закачки [Mahue et al., 2022; Ипатов и др., 2023]. Например, в работе [Luo et al., 2020] представлен комплексный инверсионный подход для определения профиля двухфазного потока в горизонтальных скважинах. В то же время, развивается перспективное направление по определению

фильтрационно-емкостных свойств прискважинной зоны пласта. Наиболее инновационные подходы involve применение методов машинного обучения; например, в исследовании [Li et al., 2022] сверточная нейронная сеть используется для непосредственного оценивания проницаемости вблизи скважины по данным распределенных температурных измерений. Так, в работе [Yoshioka et al., 2023] предложена методика интеграции данных DTS и кривых восстановления давления для количественной оценки радиуса и проницаемости зоны повреждения в нефтяных скважинах.

Несмотря на значительный научный прогресс, задача отдельной оценки геометрических и фильтрационных параметров зоны нарушения в ПЗП в условиях двухфазной фильтрации остается недостаточно проработанной. Существующие подходы не ставят такую цель и, кроме того, требуют сложных и ресурсоемких процедур численной инверсии для определения фильтрационных свойств пластов [Muradov et al., 2017; Бадертдинова, 2015]. Вышесказанное обуславливает актуальность разработки простого, физически обоснованного и практически применимого аналитического инструмента для экспресс-диагностики состояния ПЗП по данным стандартных промыслово-геофизических исследований. Целью настоящей работы является разработка и апробация методики, основанной на новом аналитическом решении, для последовательного определения радиуса и проницаемости зоны нарушения в ПЗП по данным нестационарной термометрии при двухфазной фильтрации нефти и воды.

Материалы и методы исследований

Математическая модель и аналитическое решение

Основой для разработки методики послужила математическая модель неизоэнтальпической двухфазной фильтрации в пористой среде. Модель включает систему уравнений сохранения массы для каждой фазы (воды и нефти) и уравнение переноса тепла.

Уравнение сохранения массы для фазы i ($i=1$ для воды, $i=2$ для нефти):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi S_i \rho_i) + \operatorname{div}(\rho_i \vec{v}_i) = 0 \quad (1)$$

где t – время; ϕ – пористость пласта; S_i – насыщенность i -той фазой; ρ – плотность флюида; $\vec{v}$ – скорость фильтрации, описываемая обобщенным законом Дарси:

$$\vec{v}_i = \frac{k k_i}{\mu_i} \nabla p \quad (2)$$

где k – абсолютная проницаемость пласта, относительные фазовые проницаемости k_i зависят от водонасыщенности S_i , μ – вязкость фазы.

Уравнение переноса тепла (энергии) записано с учетом конвективного, кондуктивного теплопереноса и баротермического эффекта [Шарафутдинов, 1999]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(1-\phi) \rho_s c_s T + \sum_{i=1}^2 \phi \rho_i c_i S_i T \right] + \operatorname{div} \sum_{i=1}^2 \rho_i c_i \vec{v}_i T = \operatorname{div}(\lambda \nabla T) - \sum_{i=1}^2 \varepsilon_i \rho_i c_i \vec{v}_i \nabla p + \sum_{i=1}^2 \phi \eta_i \rho_i c_i \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3)$$

где c – удельная теплоемкость; S – насыщенность; T – температура; p – давление; λ – теплопроводность насыщенной пористой среды; ε – коэффициент Джоуля-Томсона; η – адиабатический коэффициент; индекс s относится к скелету пористой среды.

Для получения аналитического решения был рассмотрен случай плоскорадиальной фильтрации несжимаемых фаз в жестком (несжимаемом) пласте ($\rho_i, \phi = \text{const}$) при постоянном дебите жидкости из пласта. Рассматривается гидродинамически совершенная скважина, полностью вскрывающая пласт постоянной мощности h . Случай

чай несовершенного вскрытия пласта, приводящий к возникновению вертикальных составляющих скорости фильтрации и искажению температурного поля вблизи забоя, в рамках данной аналитической модели не учитывается.

В данной модели принимается допущение пренебрежимо малой теплопроводности среды ($\lambda=0$) и отсутствия теплообмена на границе пласт–скважина. Это обосновано конвективно-доминирующим режимом теплопереноса в ПЗП: высокая скорость фильтрации вблизи забоя позволяет пренебречь кондуктивным теплообменом с окружающими породами и элементами конструкции скважины на рассматриваемых интервалах времени. Таким образом, температура притока принимается равной температуре флюида на стенке скважины ($r=r_w$), а сток тепла из пласта определяется исключительно выносом внутренней энергии потоком жидкости через границу раздела сред. В этом случае уравнение энергии (3) сводится к неоднородному уравнению конвекции:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \nabla T = \Phi(\vec{r}, t) \quad (4)$$

Здесь

$$\Phi(\vec{r}, t) = \sum_{i=1}^2 \varepsilon_i \rho_i c_i \vec{v}_i \nabla p + \sum_{i=1}^2 \phi \eta_i \rho_i c_i \frac{\partial p}{\partial t} \quad (5)$$

– функция распределенных тепловых источников, обусловленных баротермическим эффектом;

$$\vec{u} = \frac{\rho_1 c_1 \vec{v}_1 + \rho_2 c_2 \vec{v}_2}{C_{res}} \quad (6)$$

– скорость конвективного теплопереноса.

$$C_{res} = (1 - \phi) \rho_s c_s + \phi \sum_{i=1}^2 \rho_i c_i S_i \quad (7)$$

– объемная теплоемкость насыщенной пористой среды.

В радиальных координатах при постоянном суммарном дебите жидкости Q можно записать:

$$\begin{aligned} v_i(r) &= \frac{Q_i}{2\pi h} \\ Q_1 &= Q \cdot W \\ Q_2 &= Q \cdot (1 - W) \end{aligned} \quad (8)$$

где h – мощность пласта, W – обводненность скважинной продукции.

Для несжимаемых фаз и скелета при постоянных граничных условиях $Q_i = \text{const}$. Такая модель известна как модель жесткого пласта или модель в приближении стационарного поля давления [Чекалюк, 1965]:

$$\vec{u}(r, t) = \frac{\rho_1 c_1 Q_1 + \rho_2 c_2 Q_2}{2\pi h C_{res}} = \frac{u_0}{r}, \quad u_0 = \frac{\rho_1 c_1 Q_1 + \rho_2 c_2 Q_2}{2\pi h C_{res}}, \quad (9)$$

$$\Phi(\vec{r}, t) = \frac{\varepsilon_1 \rho_1 c_1 Q_1 + \varepsilon_2 \rho_2 c_2 Q_2}{2\pi h C_{res}} \frac{\partial p}{\partial r} + \phi \frac{\eta_1 \rho_1 c_1 S_1 + \eta_2 \rho_2 c_2 S_2}{C_{res}} \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (10)$$

Обозначим эффективный адиабатический коэффициент для смеси:

$$\eta^* = \phi \frac{\eta_1 \rho_1 c_1 S_1 + \eta_2 \rho_2 c_2 S_2}{C_{res}} \quad (11)$$

и эффективный коэффициент Джоуля-Томсона для гомогенной смеси нефть+вода:

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon_1 \rho_1 c_1 Q_1 + \varepsilon_2 \rho_2 c_2 Q_2}{\rho_1 c_1 Q_1 + \rho_2 c_2 Q_2}. \quad (12)$$

Тогда:

$$\Phi(\vec{r}, t) = \varepsilon^* \frac{u_0}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \eta^* \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (13)$$

Уравнение энергии можем переписать в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{u_0}{r} \left[\frac{\partial T}{\partial r} + \varepsilon^* \frac{\partial p}{\partial r} \right] = \eta^* \frac{\partial p}{\partial t} \quad (14)$$

$$T|_{t=0} = T_{res}, \quad p|_{t=0} = P_{res}.$$

Для рассматриваемой модели для учета адиабатического эффекта при изменении давления в пласте с P_{res} до $p(r)$ можно записать задачу в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{u_0}{r} \left[\frac{\partial T}{\partial r} + \varepsilon^* \frac{\partial p}{\partial r} \right] = 0 \quad (15)$$

$$T|_{t=0} = \eta^* [p(r) - P_{res}] = f(r) \quad (16)$$

По аналогии с однофазной фильтрацией решение запишется как [Чекалюк, 1965; Рамазанов, 2017]:

$$T(r, t) = f(r_T) + \varepsilon [p(r_T) - p(r)], \quad (17)$$

$$r_T = \sqrt{r^2 + 2u_0 t}. \quad (18)$$

Здесь r_T – радиус исследования. Он представляет собой расстояние в пласте, с которого тепловой сигнал достигает скважины к моменту времени t , распространяясь со скоростью конвективного теплопереноса. Полученное аналитическое решение (17)–(18) является основой для предлагаемой методики интерпретации зарегистрированной нестационарной температуры.

Распределение давления в пласте определяется следующим образом (рис. 1):

$$p(r) = \begin{cases} P_d - \frac{Q}{2\pi h k_d \left(\frac{k_1}{\mu_1} + \frac{k_2}{\mu_2} \right)} \ln \left(\frac{r_d}{r} \right), & r_w \leq r \leq r_d \\ P_{res} - \frac{Q}{2\pi h k \left(\frac{k_1}{\mu_1} + \frac{k_2}{\mu_2} \right)} \ln \left(\frac{R}{r} \right), & r_d \leq r \leq R \end{cases} \quad (19)$$

где k_d , k – абсолютная проницаемость ближней (призабойной) и дальней (ненарушенной) зоны пласта соответственно, r_w , r_d , R – радиус скважины, нарушенной зоны и контура питания соответственно, P_d – давление на границе зоны нарушения фильтрационных свойств:

$$P_d = P_{res} - \frac{Q}{2\pi h k \left(\frac{k_1}{\mu_1} + \frac{k_2}{\mu_2} \right)} \ln \left(\frac{R}{r_d} \right) \quad (20)$$

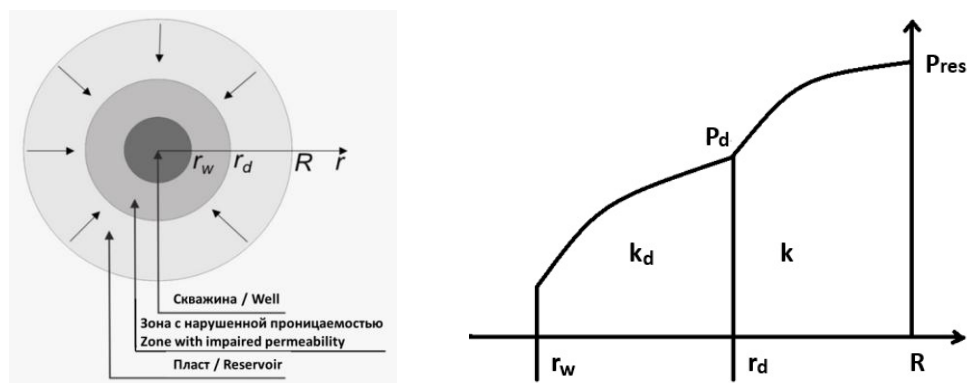


Рис. 1. Геометрия модели (слева) и распределения давления в пласте (справа) /
Fig. 1. Geometry of the model (left) and pressure distribution in the reservoir (right)

Методика определения параметров зоны нарушения

Предлагаемая методика основана на анализе диагностического графика зависимости забойной температуры от натурального логарифма времени $T(\ln(t))$. Теоретическая модель (17)–(19) предсказывает, что для пласта с радиальной неоднородностью этот график должен состоять из двух прямолинейных участков с различными наклонами, соответствующими фильтрации в нарушенной (ПЗП) и ненарушенной зонах пласта. Однако в реальных условиях (в том числе и при численном моделировании) переход между этими участками является плавным из-за влияния сглаживающих физических эффектов (теплопроводность, сжимаемость).

Ввиду плавности перехода, определение границы зон по логарифмической производной $\partial T / \partial (\ln(t))$ может приводить к погрешностям. Поэтому был применен более устойчивый алгоритм, основанный на билинейной аппроксимации температурной кривой, который включает следующие этапы:

1. *Идентификация линейных участков.* На диагностическом графике $T(\ln(t))$ визуально или алгоритмически определяются два интервала времени, соответствующие линейным трендам. Первый интервал характеризует фильтрацию внутри ПЗП, второй – в ненарушенной части пласта [Исламов, Рамазанов, 2022].

2. *Билинейная регрессия.* Для каждого из выбранных интервалов данных методом наименьших квадратов (МНК) строятся независимые аппроксимирующие прямые:

$$T_1(\ln t) = m_1 \ln t + b_1 \text{ для первого интервала (ПЗП);}$$

$$T_2(\ln t) = m_2 \ln t + b_2 \text{ для второго интервала (пласт).}$$

Здесь m_1 , m_2 – тангенсы углов наклона (коэффициенты, характеризующие интенсивность баротермического эффекта) для соответствующей зоны, а b_1 и b_2 – свободные члены линейной регрессии.

3. *Определение времени перехода (τ) и радиуса нарушенной зоны (r_d).* После нахождения оптимальных аппроксимирующих прямых вычисляется точка их пересечения. Абсцисса этой точки $\ln(\tau)$ соответствует логарифму времени перехода теплового фронта через границу ПЗП:

$$\ln \tau = \frac{b_2 - b_1}{m_2 - m_1}$$

Время перехода τ вычисляется как $\tau = \exp(\ln(\tau))$. Зная τ и предварительно рассчитанный по промысловым данным параметр скорости конвекции u_0 (формула 9), радиус нарушенной зоны r_d определяется из выражения (18).

4. *Определение проницаемостей (k_d и k).* Тангенсы углов наклона m_1 и m_2 , полученные на шаге 2, напрямую характеризуют интенсивность эффекта Джоуля-Томсона. Проницаемость k (в м²) связана с наклоном m следующим соотношением, выведенным из аналитического решения:

$$k = \frac{\varepsilon^* Q}{4\pi h \alpha m}$$

где

$$\alpha = \frac{k_1}{\mu_1} + \frac{k_2}{\mu_2}$$

– коэффициент, характеризующий суммарную подвижность фаз.

Проницаемость нарушенной зоны k_d вычисляется на основе наклона m_1 , а проницаемость пласта k – на основе наклона m_2 .

Данный алгоритм позволяет объективно и с высокой точностью определить как геометрические (r_d), так и фильтрационные (k_d , k) параметры ПЗП, анализируя стабильные линейные тренды на диагностическом графике.

Следует отметить, что при известной проницаемости пласта (определенной, например, по данным ранее проведенных гидродинамических исследований) проницаемость зоны нарушения может быть напрямую вычислена на основе наклона линейных участков диагностического графика:

$$k_d = k \frac{m_2}{m_1}.$$

Результаты и их обсуждение

Для апробации и демонстрации предложенной методики был проведен численный эксперимент. В программном комплексе Ansys была создана модель неизотермической двухфазной фильтрации, максимально полно учитывающая физические процессы, включая конвективный и кондуктивный теплоперенос, дроссельный и адиабатические эффекты, сжимаемость флюидов и скелета. В эту модель были заложены следующие фактические (эталонные) параметры:

• **Свойства флюидов и пласта:** плотность воды $\rho_l = 1000$ кг/м³, плотность нефти $\rho_2 = 800$ кг/м³, плотность скелета породы 2650 кг/м³, вязкость воды $\mu_l = 1$ мПа·с, вязкость нефти $\mu_2 = 5$ мПа·с; удельная теплоемкость воды $c_l = 4200$ Дж/(кг·К), нефти $c_2 = 2100$ Дж/(кг·К), скелета породы $c_{sk} = 800$ Дж/(кг·К); пористость $\phi = 0.2$.

• **Фактические параметры ПЗП:** радиус $r_d = 0.6$ м; проницаемость $k_d = 10$ мД.

Фактические параметры пласта: абсолютная проницаемость $k = 100$ мД, толщина $h = 1$ м. Относительные фазовые проницаемости k_i заданы в модельном виде как функции водонасыщенности пласта S_l :

$$\begin{aligned} k_1 &= S_l^2 \\ k_2 &= (1 - S_l)^2 \end{aligned}$$

• **Режим работы:** постоянный суммарный дебит жидкости $Q = 4$ м³/сут при водонасыщенности $S_l = 0.5$, что соответствует обводненности продукции 83.3%.

Полученная в результате численного моделирования кривая изменения забойной

температуры во времени рассматривалась как «синтетические промысловые данные». Эти данные были обработаны с помощью разработанной методики.

Центральным этапом интерпретации является анализ диагностического графика в координатах $T(\ln(t))$, представленного на рисунке 2. На графике показаны данные численного моделирования, выделенные участки, использованные для линейной регрессии, и результирующие аппроксимирующие прямые для прискважинной зоны (Зона 1) и удаленной части пласта (Зона 2).

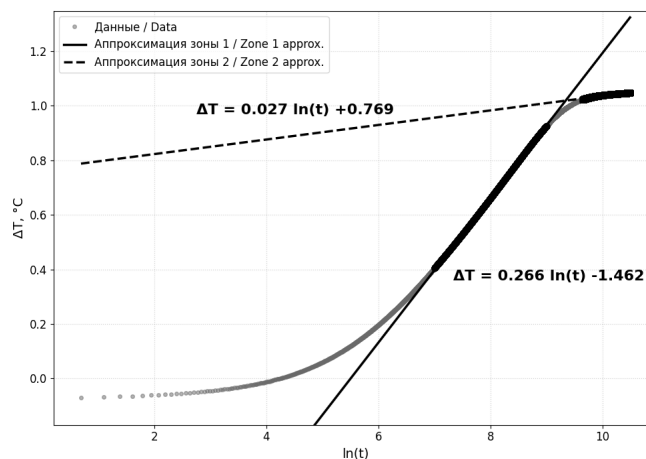


Рис. 2. Диагностический график $T(\ln t)$ с билинейной аппроксимацией для определения параметров ПЗП /

Fig. 2. Diagnostic graph $T(\ln t)$ with bilinear approximation for determining the near-wellbore zone parameters

Пошаговая обработка данных:

1. *Определение наклонов и времени перехода.* С помощью билинейной регрессии по участкам, показанным на рисунке 2, были определены наклоны прямых: $m_1 = 0.266$ и $m_2 = 0.027$. Соотношение наклонов m_1/m_2 составило 9.95, что практически совпадает с соотношением проницаемостей пласта и ПЗП ($100/10 = 10$). Время, соответствующее точке пересечения прямых, составило $\tau \approx 11408$ с (около 3.17 часов).

2. *Расчет параметров ПЗП.* Используя полученные m_2 , m_1 и τ , по описанным выше алгоритмам были рассчитаны искомые параметры: радиус нарушенной зоны r_d , проницаемость ПЗП k_d и проницаемость пласта k .

Сводные результаты сопоставления фактических и рассчитанных по методике параметров представлены в таблице 1.

Таблица 1 Table 1

Сравнение фактических и расчетных параметров ПЗП / Comparison of actual and calculated parameters of the near-wellbore zone

Параметр / Parameter	Фактическое значение / Actual value	Расчетное значение (по методике) / Calculated value (by methodology)	Относительная погрешность, % / Relative error, %
Радиус нарушенной зоны, r_d (м) / Radius of the disturbed zone, r_d (m)	0.60	0.592	1.4
Проницаемость ПЗП, k_d (мД) / near-wellbore permeability, k_d (mD)	10.0	10.79	7.9
Проницаемость пласта, k (мД) / Reservoir permeability, k (mD)	100.0	107.30	7.3

Как видно из таблицы, предложенная методика позволяет определить радиус нарушенной зоны с погрешностью 1.4 %, а проницаемости прискважинной зоны и пласта – с погрешностями 7.9 % и 7.3 % соответственно. Столь высокая точность подтверждает адекватность предложенного аналитического подхода. Небольшое расхождение является закономерным и обусловлено влиянием физических факторов (теплопроводность, сжимаемость), которые не учитываются в аналитическом решении, но присутствуют в “синтетических” данных Ansys.

Для демонстрации общего качества аппроксимации на рисунках 3 и 4 приведено сравнение исходной кривой температуры из Ansys и модельной кривой, построенной по аналитическому решению с использованием найденных параметров. Видно хорошее качественное и количественное совпадение, что подтверждает как корректность используемой аналитической модели, так и интерпретации.

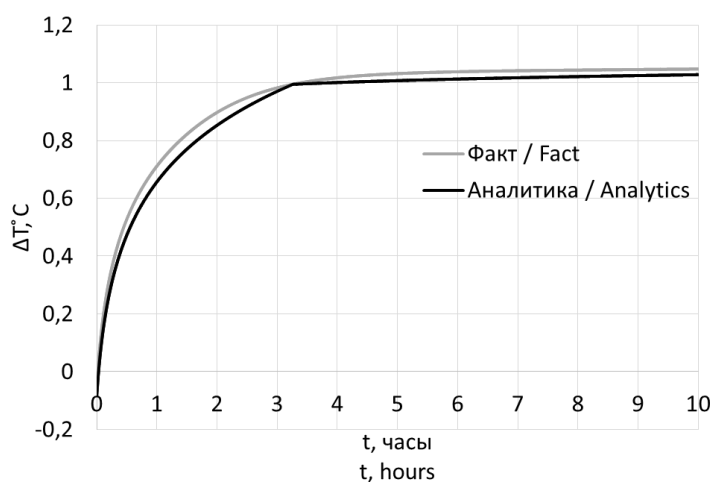


Рис. 3. Сравнение кривых $T(t)$: данные Ansys и аналитическая модель /

Fig. 3. Comparison of $T(t)$ curves: Ansys data and analytical model

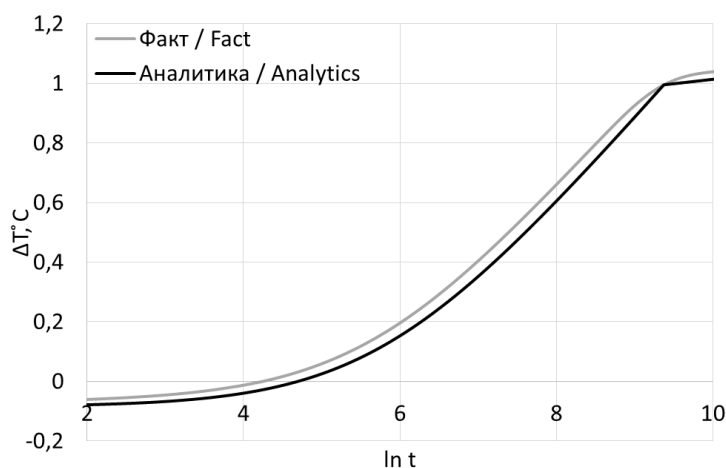


Рис. 4. Сравнение кривых $T(\ln t)$: данные Ansys и аналитическая модель /

Fig. 4. Comparison of $T(\ln t)$ curves: Ansys data and analytical model

Таким образом, результаты численного эксперимента убедительно доказывают практическую применимость разработанного подхода для экспресс-оценки состояния ПЗП.

Заключение

В настоящей работе представлена новая практическая методика для отдельной количественной оценки параметров прискважинной зоны пласта (радиуса и проницаемости) в условиях двухфазной фильтрации нефти и воды. Методика основана на разработанном аналитическом решении для нестационарного температурного поля.

Ключевым преимуществом предложенного подхода является последовательная и независимая оценка параметров ПЗП путем независимой аппроксимации линейных участков, соответствующих различным зонам на диагностическом графике $T(\ln t)$, и расчета точки их пересечения. Показано, что радиус нарушенной зоны надежно определяется по времени, соответствующему этой точке, в то время как проницаемости зон определяются по наклонам аппроксимирующих прямых.

Апробация методики на синтетических данных, полученных с помощью численного моделирования в Ansys, продемонстрировала высокую точность подхода. Определенные по аналитической методике параметры ПЗП согласуются с фактическими значениями с погрешностью порядка 1 % для радиуса и менее 8 % для проницаемостей, что является высоким показателем для экспресс-метода. Небольшое расхождение объясняется влиянием сглаживающих физических процессов, не учитываемых в аналитической модели.

Таким образом, разработанная методика представляет собой простой, физически обоснованный и эффективный инструмент для диагностики состояния ПЗП, дополняющий методы интерпретации данных термогидродинамических исследований для двухфазных систем.

Литература

1. Бадертдинова Е.Р. Определение фильтрационных и теплофизических параметров слоистого пласта по результатам термогидродинамических и гидродинамических исследований вертикальных скважин на основе теории регуляризации. // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. № 5. – С. 194–198.
2. Гайдуков Л.А., Посвянский Д.В., Новиков А.В. Исследование термогидродинамических процессов при многофазной фильтрации флюидов к скважине в техногенно-измененном пласте со вторичным вскрытием с целью определения параметров околоскважинной зоны. SPE-181964. // Российская нефтегазовая техническая конференция и выставка SPE. М.: 2016, – С. 1–14. DOI: 10.2118/181964-MS.
3. Гасумов Р.А. Особенности разработки малых месторождений (на примере газоконденсатных месторождений Северного Кавказа). // Записки Горного института. – 2016. – Т. 220. – С. 556–563. DOI: 10.18454/PMI.2016.4.556.
4. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Сохранение фильтрационно-ёмкостных свойств продуктивных пластов при их временной изоляции. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 2. – С. 180–195. DOI: 10.46698/VNC.2025.39.56.001.
5. Давлетбаев А.Я., Асалхузина Г.Ф., Уразов Р.Р., Сарапулова В.В. Гидродинамические исследования скважин в низкопроницаемых коллекторах. Новосибирск: ООО «ДОМ МИРА», 2023. – 176 с.
6. Ипатов А.И., Кременецкий М.И., Худиев Э.Р. и др. Результативность глубинного распределенного оптоволоконного мониторинга работы горизонтальных скважин, оборудованных установками электроцентробежного насоса, в «Газпром нефти». // Нефтяное хозяйство. – 2023. – № 12. – С. 58–63.
7. Исламов Д.Ф., Рамазанов А.Ш. Исследование неизотермической двумерной фильтрации в слоистом пласте. // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2022. – № 75. – С. 100–112. DOI: 10.17223/19988621/75/9.
8. Рамазанов А.Ш. Теоретические основы скважинной термометрии: учебное пособие. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2017. – 114 с.

9. Рамазанов А.Ш., Исламов Д.Ф. Аналитическая модель нестационарной температуры в неоднородном пласте. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. № 5. – С. 39–48.
10. Ситдииков М.Р. Применение симуляторов ОПЗ, ГРП и РИР в нефтесервисе и добыче. // Инженерная практика. – 2023. – № 5. – С. 12–18.
11. Чекалюк Э.Б. Термодинамика нефтяного пласта. М.: Недра, 1965. – 238 с.
12. Шарафутдинов Р.Ф. Баротермический эффект при фильтрации аномальной нефти и воды. // Прикладная механика и техническая физика. – 1999. – Т. 40. №3. – С. 18–21.
13. Anikin O.V., Bolotov A.V., Minkhanov I.F. et al. Factors influencing hydrogen peroxide decomposition dynamics for thermochemical treatment of bottomhole zone // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2022. – Vol. 12. – pp. 2587–2598. DOI: 10.1007/s13202-022-01507-z.
14. Bourdet D. Well test analysis: the use of advanced interpretation models. Amsterdam: Elsevier, 2002. – 426 p.
15. Cherubini A., Richard S., Jestin C. et al. Real-time downhole monitoring using DAS and DTS: a new technology for leak detection and well integrity. // In: Proceedings of International Petroleum Technology Conference. Bangkok, Thailand, 2023. – 7 p. Paper IPTC-23102-EA. DOI: 10.2523/IPTC-23102-EA.
16. Duru O., Horne R.N. Combined temperature and pressure data interpretation: Applications to Characterization of Near-Wellbore Reservoir Structures. // In: Proceedings of SPE ATCE. Denver, Colorado, USA, 2011. – pp. 1977–1994. Paper SPE 146614. DOI: 10.2118/146614-MS.
17. Li Y., Zhu D., Hill A.D. Near-wellbore permeability estimation from distributed temperature sensing data during vertical well testing using deep learning. // SPE Journal. – 2022. – Vol. 27. No. 01. – pp. 526–543.
18. Luo H., Jiang B., Li H. et al. Flow rate profile interpretation for a two-phase flow in multistage fractured horizontal wells by inversion of DTS data. // ACS Omega. – 2020. – Vol. 5. No. 34. – pp. 21728–21744. DOI: 10.1021/acsomega.0c02639.
19. Mahue V., Dawson P., Jimenez E. et al. Advances in an integrated analysis workflow of distributed acoustic sensing and distributed temperature sensing for water injection profiling on a horizontal well. // In: Proceedings of ADIPEC. Abu Dhabi, UAE, 2022. – Paper SPE-211584-MS. DOI: 10.2118/211584-MS.
20. Muradov K., Davies D., Durham C., Waterhouse R. Transient pressure and temperature interpretation in intelligent wells of the Golden Eagle Field. // In: Proceedings of SPE Europec. Paris, France, 2017. – Paper SPE 185817-MS. DOI: 10.2118/185817-MS.
21. Noble L., Rees H., Thiruvengathan P., Langnes T. Using distributed fibre optic sensing to recover well integrity and restore production. // In: Proceedings of SPE/ICoTA Well Intervention Conference and Exhibition. Virtual, 2021. Paper SPE-204450-MS. DOI: 10.2118/204450-MS.
22. Panini F., Onur M. Parameter estimation from sandface drawdown temperature transient data in the presence of a skin zone near the wellbore. // In: Proceedings of SPE Europec. Copenhagen, Denmark, 2018. Paper SPE 190773-MS. DOI: 10.2118/190773-MS.
23. Sharafutdinov R.F., Bochkov A.S., Sharipov A.M., Sadretdinov A.A. Filtration of live oil in the presence of phase transitions in a porous medium with inhomogeneous permeability. // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2017. – Vol. 58. No. 2. – pp. 271–274.
24. Yoshioka K., Zhu D., Hill A.D., Dawkrajai P. Integration of distributed temperature sensing and pressure transient analysis for quantitative near-wellbore characterization in oil wells. // SPE Journal. – 2023. – Vol. 28. No. 01. – pp. 412–426.

References

1. Badertdinova E.R. Determination of filtration and thermophysical parameters of a layered formation based on the results of thermohydrodynamic and hydrodynamic studies of vertical wells using regularization theory. Herald of Technological University. 2015. Vol. 18. No. 5. pp. 194–198. (In Russ.)
2. Gaydukov L.A., Posvyanskii D.V., Novikov A.V. Study of thermohydrodynamic processes during multiphase fluid filtration to a well in a technogenically-altered formation with secondary

opening for near-wellbore zone parameters determination. In: SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition SPE-181964. Moscow. 2016. pp. 1–14. DOI: 10.2118/181964-MS. (In Russ.)

3. Gasumov R.A. The specifics of operating minor deposits (as given by the examples of gas condensate deposits of the Northern Caucasus). *Journal of Mining Institute*. 2016. Vol. 220. p. 556–563. DOI: 10.18454/PMI.2016.4.556. (In Russ.)

4. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Preservation of filtration and capacity properties of productive formations during their temporary isolation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 2. pp. 180–195. DOI: 10.46698/VNC.2025.39.56.001. (In Russ.)

5. Davletbaev A.Ya., Asalkhuzina G.F., Urazov R.R., Sarapulova V.V. Hydrodynamic studies of wells in low-permeability reservoirs. Novosibirsk. DOM MIRA LLC. 2023. 176 p. (In Russ.)

6. Ipatov A.I., Kremenetsky M.I., Khudiev E.R. et al. The effectiveness of downhole distributed fiber-optic monitoring of ESP horizontal wells production in the Gazprom Neft. *Oil Industry Journal*. 2023. No. 12. pp. 58–63. DOI: 10.24887/0028-2448-2023-12-58-63. (In Russ.)

7. Islamov D.F., Ramazanov A.Sh. Investigation of nonisothermal two dimensional filtration in multilayer reservoir. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2022. No. 75. pp. 100–112. DOI: 10.17223/19988621/75/9. (In Russ.)

8. Ramazanov A.Sh. Theoretical foundations of well thermometry: A textbook. Ufa. Bashkir State University. 2017. 114 p. (In Russ.)

9. Ramazanov A.Sh., Islamov D.F. Analytical model of nonstationary temperature in heterogeneous reservoir. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017. Vol. 328. No. 5. pp. 39–48. (In Russ.)

10. Sitdikov M.R. Application of near-wellbore, hydraulic fracturing and inflow stimulation simulators in oilfield services and production. *Engineering Practice*. 2023. No. 5. pp. 12–18. (In Russ.)

11. Chekalyuk E.B. Thermodynamics of an oil reservoir. Moscow. Nedra. 1965. 238 p. (In Russ.)

12. Sharafutdinov R.F. Barothermic effect in filtration of anomalous oil and water. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1999. Vol. 40. No. 3. pp. 375–378. (In Russ.)

13. Anikin O.V., Bolotov A.V., Minkhanov I.F. et al. Factors influencing hydrogen peroxide decomposition dynamics for thermochemical treatment of bottomhole zone. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2022. Vol. 12. pp. 2587–2598. DOI: 10.1007/s13202-022-01507-z.

14. Bourdet D. Well test analysis: the use of advanced interpretation models. Amsterdam. Elsevier. 2002. 426 p.

15. Cherubini A., Richard S., Jestin C. et al. Real-time downhole monitoring using DAS and DTS: a new technology for leak detection and well integrity. In: *Proceedings of International Petroleum Technology Conference*. Bangkok, Thailand. 2023. 7 p. Paper IPTC-23102-EA. DOI: 10.2523/IPTC-23102-EA.

16. Duru O., Horne R.N. Combined temperature and pressure data interpretation: Applications to Characterization of Near-Wellbore Reservoir Structures. In: *Proceedings of SPE ATCE*. Denver, Colorado, USA. 2011. pp. 1977–1994. Paper SPE 146614. DOI: 10.2118/146614-MS.

17. Li Y., Zhu D., Hill A.D. Near-wellbore permeability estimation from distributed temperature sensing data during vertical well testing using deep learning. *SPE Journal*. 2022. Vol. 27. No. 01. pp. 526–543.

18. Luo H., Jiang B., Li H. et al. Flow rate profile interpretation for a two-phase flow in multistage fractured horizontal wells by inversion of DTS data. *ACS Omega*. 2020. Vol. 5. No. 34. pp. 21728–21744. DOI: 10.1021/acsomega.0c02639.

19. Mahue V., Dawson P., Jimenez E. et al. Advances in an integrated analysis workflow of distributed acoustic sensing and distributed temperature sensing for water injection profiling on a horizontal well. In: *Proceedings of ADIPEC*. Abu Dhabi, UAE. 2022. Paper SPE-211584-MS. DOI: 10.2118/211584-MS.

20. Muradov K., Davies D., Durham C., Waterhouse R. Transient pressure and temperature interpretation in intelligent wells of the Golden Eagle Field. In: *Proceedings of SPE Europec*. Paris, France. 2017. Paper SPE 185817-MS. DOI: 10.2118/185817-MS.

21. Noble L., Rees H., Thiruvengathan P., Langnes T. Using distributed fibre optic sensing to recover well integrity and restore production. In: Proceedings of SPE/ICoTA Well Intervention Conference and Exhibition. Virtual. 2021. Paper SPE-204450-MS. DOI: 10.2118/204450-MS.

22. Panini F., Onur M. Parameter estimation from sandface drawdown temperature transient data in the presence of a skin zone near the wellbore. In: Proceedings of SPE Europe. Copenhagen, Denmark. 2018. Paper SPE 190773-MS. DOI: 10.2118/190773-MS.

23. Sharafutdinov R.F., Bochkov A.S., Sharipov A.M., Sadretdinov A.A. Filtration of live oil in the presence of phase transitions in a porous medium with inhomogeneous permeability. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2017. Vol. 58. No. 2. pp. 271–274.

24. Yoshioka K., Zhu D., Hill A.D., Dawkrajai P. Integration of distributed temperature sensing and pressure transient analysis for quantitative near-wellbore characterization in oil wells. SPE Journal. 2023. Vol. 28. No. 01. pp. 412–426.

УДК 504.75

DOI: 10.46698/VNC.2026.24.11.001

Оригинальная статья

Подвижность тяжелых металлов в почвах агроландшафтов: факторы, оценка и экологические последствия на примере Садонского свинцово-цинкового комбината

И.Д. Алборов[✉], О.Г. Бурдзиева[✉], А.С. Кануков[✉], И.Г. Архиреева[✉],
Э.В. Дадтеева[✉]

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

Статья поступила: 15.01.2026, доработана: 20.03.2026, принята к публикации: 24.03.2026

Резюме: Актуальность исследования обусловлена необходимостью экологического нормирования антропогенного воздействия на агроландшафты, так как превышение предельно допустимых концентраций подвижных форм тяжелых металлов в почвах приводит к деградации земель, снижению продуктивности агроценозов и накоплению токсикантов в сельскохозяйственной продукции, создавая угрозу экологической и продовольственной безопасности. **Цель исследований.** Систематизация данных о факторах, определяющих подвижность тяжелых металлов в почвах, методах ее оценки и региональных особенностях проявления в почвах Садонского свинцово-цинкового комбината. **Методы.** Рассмотрены методологические подходы к экологическому нормированию — антропоцентрический и биоцентрический, а также система критериев оценки состояния почв (химические, физические показатели, превышение ПДК, потери гумуса). Приведена классификация ТМ по степени опасности и основные источники их поступления: природные (выветривание пород) и техногенные (промышленность, автотранспорт, сельское хозяйство). Особое внимание уделено факторам, определяющим подвижность металлов: формам нахождения (валовые и подвижные), содержанию гумуса, гранулометрическому составу, реакции среды (рН), окислительно-восстановительным условиям и влажности почвы. **Результаты работ.** Показано, что увеличение влажности с 55–60 % до 80–90 % может повышать подвижность элементов в 1,5–2 раза. Проанализированы методы оценки подвижных форм с использованием различных экстрагентов. На примере Республики Северная Осетия–Алания (РСО–Алания) продемонстрированы региональные особенности накопления тяжелых металлов. По результатам полевых исследований в зоне влияния Садонского свинцово-цинкового комбината установлено, что пиковые концентрации свинца и цинка приурочены к верхним горизонтам почв, что подтверждает техногенную природу загрязнения. Основными источниками выступают хвостохранилища (Унальское – 6,1 га, Фиагдонское – 5,6 га), в отходах которых содержание свинца достигает 0,16 %, цинка – 0,15 %. В биопробах (фрукты, картофель) из населенных пунктов Алагирского ущелья выявлено превышение допустимых уровней: содержание свинца во фруктах оказалось почти вдвое выше фоновых значений, а в картофеле зафиксировано превышение ПДК по цинку в 1,2–1,6 раза. Обоснована необходимость перехода от оценки валового содержания ТМ к определению их подвижных форм.

Ключевые слова: тяжелые металлы, подвижность, экологическое нормирование, почва, ПДК, агроландшафт.

Для цитирования: Алборов И.Д., Бурдзиева О.Г., Кануков А.С., Архиреева И.Г., Дадтеева Э.В. Подвижность тяжелых металлов в почвах агроландшафтов: факторы, оценка и экологические последствия на примере Садонского свинцово-цинкового комбината. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 168–179. DOI: 10.46698/VNC.2026.24.11.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.24.11.001

Original paper

Mobility of heavy metals in agricultural landscape soils: factors, assessment, and environmental consequences using the Sadon lead-zinc plant as a case study

I.D. Alborov^{ORCID}, O.G. Burdzieva^{ORCID}, A.S. Kanukov^{ORCID}, I.G. Arkhireeva^{ORCID},
E.V. Dadteeva^{ORCID}

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

Received: 15.01.2026, revised: 20.03.2026, accepted: 24.03.2026

Abstract: The relevance of the study is determined by the need for environmental regulation of anthropogenic impact on agricultural landscapes, since exceeding the maximum permissible concentrations of mobile forms of heavy metals in soils leads to land degradation, reduced productivity of agroecosystems, and accumulation of toxicants in agricultural products, posing a threat to environmental and food security. **Aim.** To systematize data on the factors determining the mobility of heavy metals in soils, methods for its assessment, and regional characteristics of its manifestation in the soils of the Sadon Lead-Zinc Plant. **Methods.** Methodological approaches to environmental regulation—anthropocentric and biocentric—as well as a system of criteria for assessing soil conditions (chemical and physical indicators, exceeding maximum permissible concentrations, humus loss) are considered. A classification of HMs by hazard level and the main sources of their input are provided: natural (rock weathering) and technogenic (industry, motor transport, agriculture). Particular attention is paid to factors determining metal mobility: forms of occurrence (total and mobile), humus content, particle size distribution, reaction of the medium (pH), redox conditions, and soil moisture. **Results.** It is shown that an increase in soil moisture from 55–60 % to 80–90 % can increase the mobility of elements by 1.5–2 times. Methods for assessing mobile forms using various extractants are analyzed. Regional features of heavy metal accumulation are demonstrated using the example of the Republic of North Ossetia–Alania (RNO–Alania). Based on field studies in the zone affected by the Sadon Lead-Zinc Plant, it was established that peak concentrations of lead and zinc are confined to the upper soil horizons, confirming the technogenic nature of the pollution. The main sources are tailings dumps (the Unal dump – 6.1 ha, the Fiagdon dump – 5.6 ha), whose waste contains lead reaching 0.16% and zinc 0.15 %. In biological samples (fruits, potatoes) from populated areas of the Alagir Gorge, exceedances of permissible levels were revealed: the lead content in fruits was almost twice as high as background values, while potatoes showed exceedances of the maximum permissible concentration for zinc by a factor of 1.2–1.6. The necessity of shifting from assessing the total HM content to determining their mobile forms is substantiated.

Keywords: heavy metals, mobility, environmental regulation, soil, maximum permissible concentration (MPC), agricultural landscape.

For citation: Alborov I.D., Burdzieva O.G., Kanukov A.S., Arkhireeva I.G., Dadteeva E.V. Mobility of heavy metals in agricultural landscape soils: factors, assessment, and environmental consequences using the Sadon lead-zinc plant as a case stud. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2026. 16(1): 168–179. DOI: 10.46698/VNC.2026.24.11.001

Введение

Проблема загрязнения агроландшафтов тяжелыми металлами является одной из приоритетных в современной экологии. В отличие от органических загрязнителей, тяжелые металлы (ТМ) не подвергаются биодegradации, а лишь перераспределяются между компонентами экосистем, накапливаясь в почвах и включаясь в трофические цепи [Wang et al., 2019]. Валовое содержание металлов в почве часто не является исчерпывающим показателем экологической опасности. Ключевое значение имеет их подвижность – способность переходить в почвенный раствор и мигрировать в грунтовые воды и атмосферу или поглощаться растениями.

Цель данной работы – систематизировать данные о факторах, определяющих подвижность тяжелых металлов в почвах, методах ее оценки и региональных особенностях проявления в почвах Садонского свинцово-цинкового комбината.

Методы и методологические подходы к нормированию и оценке загрязнения почв

Экологическое нормирование антропогенного воздействия на почвы до сих пор остается сложной научной задачей. Анализ литературы [Снакин и др., 1993; Van der Ploeg, Vlijm, 1978] показывает существование двух основных подходов: антропоцентрического (сохранение среды для нужд человека) и биоцентрического (сохранение естественного течения сукцессий). Наиболее перспективным для долгосрочного устойчивого развития признается подход, основанный на сохранении биогеоценоза в целом и безусловном праве всех организмов на существование.

Для оценки состояния почв используется система параметров, включающая химические (состав обменных катионов, содержание гумуса, соотношение C : N, окислительно-восстановительный потенциал) и физические показатели (водопроницаемость, плотность, структура).

В России и странах СНГ разработаны критерии экологической оценки почв, дифференцированные для селитебных и сельскохозяйственных территорий (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Обобщенные критерии оценки состояния почв (по данным «Зеленый мир», 1994) / Generalized criteria for assessing soil condition (according to “Green World”, 1994)

Показатель / Indicator	Экологическое бедствие / Ecological disaster	Чрезвычайная ситуация / Emergency situation	Относительно удовлетворительная / Relatively Satisfactory
Потери гумуса за 10 лет, % / Humus loss over 10 years, %	>25	10–25	<1
Увеличение плотности (кратность) / Increase in density (fold)	>1.4	1.3–1.4	≤1.1
Превышение ПДК хим. веществ (1 класс) / Exceeding the MPC of chemical substances (hazard class 1)	>3	2–3	≤1

Эти критерии базируются на таких показателях, как мощность экспозиционной дозы, содержание радионуклидов, суммарный показатель химического загрязнения (Z_c), а также специфические для агроценозов показатели – потери гумуса, увеличение плотности, фитотоксичность.

Классификация и источники поступления тяжелых металлов

Согласно ГОСТ Р70281-2022, химические вещества по степени опасности делятся на три класса. К I классу (высокоопасные) относятся As, Cd, Hg, Pb, Se, Zn, Tl; ко II (умеренно опасные) – Co, Ni, Mo, Cu, Sb, Cr; к III (малоопасные) – Ba, V, W, Mn, Sr.

Источники поступления ТМ в агроландшафты делятся на природные (выветривание пород) и техногенные. Основные техногенные источники:

- Выбросы предприятий черной и цветной металлургии.
- Автотранспорт (особенно соединения свинца и кадмия).
- Сельскохозяйственная деятельность (минеральные удобрения, пестициды, осадки сточных вод, навоз).
- Трансграничный перенос загрязненных воздушных масс.

Анализ данных по РСО–Алания [Заалишвили и др., 2021] показывает, что выбросы от автотранспорта составляют основную долю загрязнения (рис. 1), при этом значительную опасность представляют соединения свинца, цинка и оксиды азота.

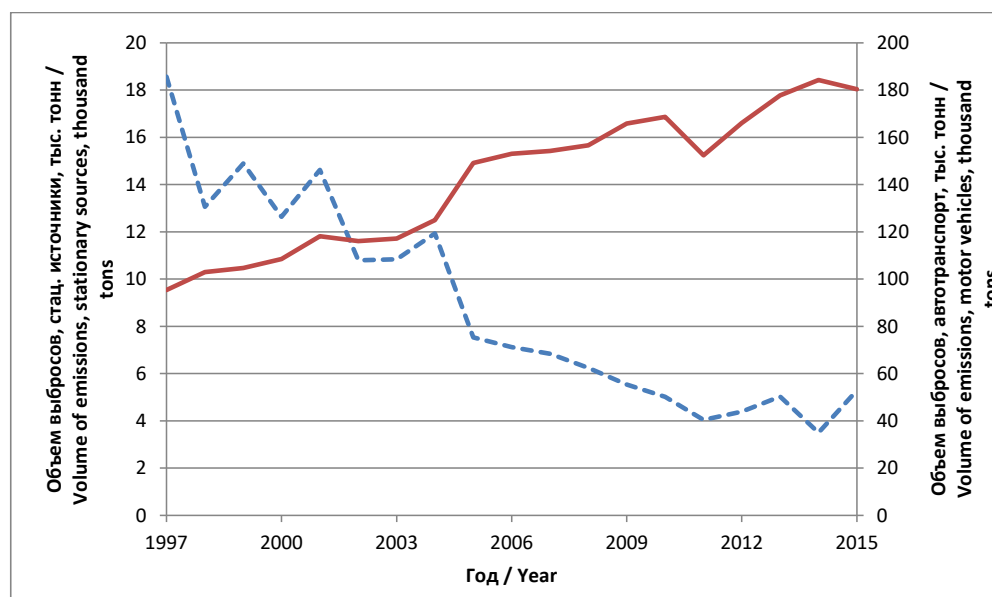


Рис. 1. Динамика объемов выбросов от стационарных источников и автотранспорта на территории РСО-А за 1997–2015 гг. (пунктирная линия – объемы выбросов от стационарных источников, непрерывная линия – объемы выбросов от автотранспорта) /

Fig. 1. Dynamics of emission volumes from stationary sources and motor vehicles in the territory of the Republic of North Ossetia–Alania for 1997–2015 (dotted line – emission volumes from stationary sources, solid line – emission volumes from motor vehicles)

Факторы, определяющие подвижность тяжелых металлов в почве

Подвижность ТМ – это способность их соединений переходить из твердой фазы почвы в почвенный раствор. Она является интегральным показателем, зависящим от комплекса факторов.

Первый фактор – формы нахождения металлов в почве. Тяжелые металлы присутствуют в почве в различных формах: в виде катионов (M^+), анионов (M^-),

амфотерных соединений (M^{+}) или нейтральных комплексов (M°) [Алексеев, 1987]. С экологической точки зрения важно разделение на валовое содержание – общее количество элемента в почве и подвижные (доступные) формы – часть элемента, способная переходить в раствор и поглощаться растениями. Именно подвижные формы определяют токсическое воздействие [Thinh et al., 2021].

Второй фактор обусловлен влиянием свойств почвы:

1. Содержание гумуса: Органическое вещество обладает высокой поглотительной способностью. Гумусовые кислоты образуют с металлами комплексные органо-минеральные соединения, снижая их подвижность. Поэтому черноземы, богатые гумусом, более устойчивы к загрязнению, чем дерново-подзолистые почвы [Обухов, Лепнёва, 1989]. Исследования в РСО-Алания подтверждают, что основное депонирование ТМ происходит в верхнем гумусовом горизонте.

2. Гранулометрический состав: глинистые и суглинистые почвы фиксируют металлы сильнее, чем песчаные и супесчаные.

3. Реакция среды (pH): в кислой среде ($pH < 5.5$) подвижность большинства катионогенных элементов (Cd, Zn, Pb, Ni) резко возрастает. В нейтральной и слабощелочной среде они образуют труднорастворимые гидроксиды и карбонаты, выпадая в осадок.

4. Окислительно-восстановительный потенциал: влияет на валентность и, следовательно, на токсичность элементов (например, Cr^{6+} более токсичен и подвижен, чем Cr^{3+}).

Третий фактор – влияние влажности и внешних условий. Установлено, что с увеличением влажности почвы подвижность ТМ возрастает. При повышении влажности с 55–60 % до 80–90 % суммарное содержание подвижных форм исследованных элементов увеличилось в 1.5–2 раза (табл. 2). Это связано с изменением ионной силы раствора и активизацией микробиологических процессов [Обухов, Лепнёва, 1989].

Таблица 2 / Table 2

Изменение подвижности микроэлементов в зависимости от влажности почвы (выщелоченный чернозем) / Changes in the mobility of trace elements depending on soil moisture (leached chernozem)

Влажность почвы / Soil moisture	Элемент, мг/кг Element, mg/kg									
	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Pb	Co	Cd	Fe	сумма / sum
55–60	4.5–8.2	129–178	2.0–3.1	1.7–2.8	10.4–13.5	1.7–2.2	4.7–7.2	0.50–0.71	76–132	3476–4054
80–90	114–141	2166–2394	39–59	26–43	73–84	17–43	93–98	249–270	141–181	3425–3956

Методы оценки подвижности и нормативы

Для оценки содержания подвижных форм используются различные экстрагенты. Наибольшее распространение получили:

- 1н HCl и 1н HNO₃ – для извлечения «кислоторастворимых» форм, характеризующих потенциальный резерв.
- Ацетатно-аммонийный буфер (pH 4.8) – для оценки актуальных запасов, доступных растениям [Попов, Соловьев, 1991].
- Вытяжки по Пейве-Ринькису – для дифференцированной оценки обеспеченности растений микроэлементами.

Предельно допустимые концентрации (ПДК) металлов в почвах сильно варьируют в зависимости от почвенно-климатических условий. Для более точной оценки целесообразно использовать региональные шкалы. В таблице 3 представлены данные по содержанию подвижных форм ТМ в выщелоченных черноземах РСО–Алания в сравнении с ПДК.

Особую опасность представляет зона влияния промышленных предприятий г. Владикавказа. В почвах, прилегающих к заводам «Электроцинк» и «Победит», зафиксировано превышение ПДК по цинку, свинцу и меди в 2–12 раз, что классифицируется как чрезвычайная экологическая ситуация.

Биологические последствия высокой подвижности металлов

Повышенная подвижность ТМ напрямую влияет на живые организмы. У микроорганизмов угнетается активность почвенных ферментов, снижается интенсивность разложения органического вещества. Микроорганизмы могут служить индикаторами загрязнения [Наплекова, Булавко, 1983].

Таблица 3 / Table 3

Содержание подвижных форм ТМ в почвах РСО–Алания (мг/кг) /
Content of mobile forms of heavy metals in the soils of the Republic
of North Ossetia–Alania (mg/kg)

Элемент / Element	ПДК (подвижные формы) / MPC (mobile forms)	Фактическое содержание / Actual content	Отклонение, % / Deviation, %
Свинец (Pb)	0.3	1.2–2.2	+300...+600
Цинк (Zn)	23	10.4–54.2	до +135
Кадмий (Cd)	н/д	0.2–1.3	–
Медь (Cu)	3	1.7–9.5	до +200

Примечание: данные обобщены по материалам Джанаева [2008] /
Note: data summarized based on materials from Dzhanayev [2008].

В случае растений металлы (Zn, Cu, Cd, Pb) проникают через корневые системы. Наблюдается антагонизм и синергизм ионов (например, Ca подавляет поступление Cd, а Zn и Cu могут усиливать токсичность друг друга). У сои и зерновых культур зафиксировано накопление Zn, Ni и Cd выше допустимых остаточных количеств (ДОК), что делает продукцию опасной для здоровья человека и животных.

Поскольку подвижные формы легко включаются в биологический круговорот, концентрация токсинов в продукции растениеводства может в сотни раз превышать их содержание в почве, создавая угрозу для организма человека, находящегося на вершине пищевой цепи.

Кроме того, в последние годы появилось множество исследований посвященных изучению влияния микропластика (МП) на окружающую среду и его взаимодействия с тяжелыми металлами [Lu et al., 2020; Wakaf et al., 2020; Zhou et al., 2020; Кануков и др., 2025]. Микропластиковые частицы способны влиять на экологическое поведение и риски тяжелых металлов через прямые и косвенные механизмы. С одной стороны, они могут непосредственно модифицировать физико-химические свойства, включая процессы адсорбции и десорбции металлов, что сказывается на их биоаккумуляции и токсичности для живых организмов. С другой стороны, параметры среды, такие как pH и концентрация растворенного органического вещества, также воздействуют на взаимодействие МП с металлами, изменяя их спецификацию и биодоступность [Yu et al., 2020, 2021].

Результаты работы

В ходе совместных исследований почвенного покрова в зоне влияния Садонского свинцово-цинкового комбината (с участием геохимической партии ЦОМГЭ ИМГРЭ, с. Бирагзанг) было зафиксировано аномально высокое содержание тяжелых металлов [Алборов и др., 2011]. Для уточнения ситуации были проведены работы по оценке геохимического состояния почв на глубину распространения техногенных элементов. С этой целью в районе добычи геоматериалов были отрыты шурфы, а пробы отбирались послойно до глубины 1 м (интервал 0,2 м). Полученные данные мониторинга сведены в таблицу 4.

Таблица 4 / Table 4

**Содержание свинца и цинка по вертикальному разрезу почвенного профиля
в с. Нижний Унал / Lead and zinc content along the vertical section of the soil profile
in the village of Nizhny Unal**

Место отбора проб почвы / Soil sampling location	№ шурфа / Pit No.	Элемент / Element	Уровень почвенного горизонта, м / Soil horizon depth, m					
			0,05	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00
Нижняя терраса р. Ардон / Lower terrace of the Ardon River	1	Pb	20	0,8	0,6	0,6	0,8	1,0
		Zn	20	3	5	5	6	5
	2	Pb	20	2,0	1	1	1	1
		Zn	50	10	10	5	20	3
	3	Pb	10	5	5	4	3	4
		Zn	30	20	20	20	10	20
	4	Pb	20	20	15	8	3	3
		Zn	60	50	80	30	20	20
	5	Pb	80	50	30	20	10	4
		Zn	300	200	80	80	50	30
Верхняя терраса р. Ардон / Upper terrace of the Ardon River	6	Pb	10	8	3	3	6	4
		Zn	20	10	10	10	10	10
Район расчленения долины / Valley dissection area	7	Pb	10	8	4	2	1,5	1
		Zn	40	30	20	10	8	8
Пасека / Apiary	8	Pb	10	6	3	2	3	1
		Zn	100	20	10	8	10	8
База МГУ / MSU base	9	Pb	3	0,8	0,8	1	0,8	0,8
		Zn	20	3,0	6	10	10	10
Склон левобережья / Left-bank slope	10-13	Pb	8	1	2	0,6	1	0,3
		Zn	10	5	3	3	5	1

Анализ данных таблицы 4 показал, что пиковые концентрации свинца и цинка приходятся на верхний почвенный горизонт, что подтверждает техногенную природу загрязнения. Оценка степени загрязнения производилась путем сравнения с фоновыми концентрациями ($C_{п.ф}$) и нормативами ПДКп (мг/кг); результаты представлены в таблице 5.

Важнейшим индикатором природных процессов при техногенном воздействии является форма нахождения химических элементов в составе минералов (ионная, сорбированная), которая более информативно характеризует суть геохимических процессов, чем их валовое содержание. Миграция элементов, сопутствующих добыче руды, обусловлена деятельностью горно-перерабатывающего комплекса и его инфраструктуры. Основными источниками выступают:

- хвостохранилища (содержание свинца и цинка в шахтных водах превышает ПДК до 400 раз);
- отвалы вскрышных и коренных пород.

Таблица 5 / Table 5

**Результаты исследований почвы района с. Нижний Унал /
Results of soil studies in the area of the village of Nizhny Unal**

Химический элемент / Chemical element	Pb	Zn	Cu	Ag
Сп.ф / Cm.f	47,5	100	27	0,05
ПДКп / MPCm	200	400	100	2
Площадь загрязнения, % / Contamination area, %	45	50	точечное / point	точечное / point
Среднее на площади загрязнения / Average over the contaminated area	460	1200	100	2
Относительно ПДКп / Relative to MPCm	2,3	3	1	1
Спmax / Cmmax	1500	2000	100	2
Относительно, ПДКп / Relative to MPCm	7,5	5	1	1

Под воздействием ветров (с характерной для горно-долинной местности переменчивостью) и химических процессов на границе этих объектов происходит накопление микроэлементов в верхнем слое литосферы. Состав отходов обогащения приведен в таблице 6, где наибольшую долю занимают серебро, железо, кремний, магний и алюминий, тогда как на долю токсичных свинца и цинка приходится от 0,08 до 0,16 %.

Обсуждение результатов

Проблема защиты окружающей среды на территориях, подверженных техногенной миграции, связана с аккумуляцией металлов в почве и переходом подвижных элементов в растительность [Алборов и др., 2024]. Интенсивность накопления микроэлементов варьирует в зависимости от вида растения и его органов, а также от климатических условий. Изучение распределения элементов в ландшафте позволяет прогнозировать поведение техногенных веществ и дифференцировать их аномалии от фоновых ландшафтных концентраций.

В качестве фона для сравнения были отобраны пробы в населенных пунктах, находящихся на территории государственного заповедника (сс. Цамад, Дагом, Урсдон). В биопробах определялось валовое содержание свинца и цинка с учетом ПДК (для фруктов: 0,4 и 10 мг/кг соответственно; для картофеля: 0,5 и 10 мг/кг). Определение подвижных форм выполнялось методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Коэффициент подвижности (КП) рассчитывался как частное от деления содержания подвижных форм (Пф) на валовое (С):

$$КП = Пф/С.$$

Данные исследований приведены в таблице 7.

Таблица 6 / Table 6

Химический состав депонированных хвостов обогащения рудников Садонского комбината / Chemical composition of deposited tailings from ore processing at the Sadon Combine

Химические элементы, процент / Chemical elements, percent	Наименование хвостохранилища / Tailings storage facility name	
	Фиагдонское / Fiagdon	Унальское / Unal
Свинец, Pb	0,13	0,16
Цинк, Zn	0,15	0,08
Золото, Au	0,008	0,01
Серебро, Ag	3,55	5,13
Висмут, Bi	0,002	0,002
Кадмий, Cd	0,003	0,001
Железо, Fe	3,78	4,52
Сера, S	-	2,09
Кремний, Si	57,9	64,0
Кальций, Ca	6,25	0,89
Магний, Mg	215	0,60
Алюминий, Al	10,24	5,36
Калий, K	-	2,49
Натрий, Na	-	0,80
Мышьяк, As	0,06	0,05
Марганец, Mn	-	0,16
Титан, Ti	-	0,15
Углерод, C	-	1,69

Таблица 7 / Table 7

**Содержание свинца и цинка (мг/кг) в биопробах /
Lead and zinc content (mg/kg) in biological samples**

Населенный пункт, где отбирались пробы / Locality where samples were taken	Фрукты / Fruits				Картофель / Potatoes			
	Pb		Zn		Pb		Zn	
	вал. / gross	КП / MC	вал. / gross	КП / MC	вал. / gross	КП / MC	вал. / gross	КП / MC
Цамад, Дагом, Урсдон (экологически благополучные участки) / Tsamad, Dagom, Ursdon (ecologically safe areas)	0,23	0,6	8,1	0,8	0,4	0,8	—	—
Нижний Унал / Nizhny Unal	0,46	1,15	7,3	0,7	0,3	0,7	11,7	1,2
Верхний Унал / Verkhny Unal	—	—	8,7	0,87	0,52	1,04	16,4	1,6
Ст. Дзуарикау / St. Dzuarikau	0,51	1,2	7,3	0,73	0,12	0,2	12,3	1,2

Анализ таблицы 7 свидетельствует, что в плодах из садов Унала и Дзуарикау концентрация свинца почти вдвое выше, чем в аналогичных пробах с экологически благополучных территорий. Содержание цинка в фруктах находится на сопоставимом уровне и не превышает установленных нормативов. В отношении картофеля наблюдается иная картина: превышение ПДК по свинцу зафиксировано только в с. Унал, тогда как уровень цинка в 1,2–1,6 раза выше нормы. Таким образом, установлено, что для фруктов характерно преимущественное накопление свинца, тогда как для картофеля – цинка.

Экологическая обстановка в Алагирском ущелье формируется под воздействием предприятий Садонского свинцово-цинкового комбината, занятых в горнодобыче, и сопутствующей им инфраструктуры, расположенной на поверхности. Водная система представлена рекой Ардон и стекающими по радиальным ущельям водотоками, в которые аккумулируются шахтные воды, отличающиеся высоким содержанием токсичных тяжелых металлов. В пределах ограниченных речных террас размещены ключевые элементы инфраструктуры: бункерные хозяйства, транспортные артерии для перемещения руды, площадки для складирования пустых пород и некондиционного сырья, а также гидротехнические сооружения для хвостов обогащения. Эксплуатация этих объектов сопровождается эмиссией пылегазовых аэрозолей – продуктов минерализации руд, – которые распространяются далеко за пределы промплощадок. Это приводит к деградации горных фитоценозов, истощению ресурсной базы биоты, нарушению естественных окислительно-восстановительных процессов и сокращению биоразнообразия, что негативно отражается на качестве жизни и демографических процессах местного сообщества.

Как показывают наблюдения, наиболее существенное воздействие на состояние почв оказывают склады отходов обогащения. Ключевыми источниками загрязнения здесь выступают два хвостохранилища – Унальское (занимает 6,1 га, содержит 3,2 млн т отходов) и Фиагдонское (5,6 га, 2,3 млн т отходов). В составе этих накопленных отходов присутствуют цинк (0,15 %), свинец (до 0,16 %), сера (более 2 %), кремнезем (64 %), а также прочие химические элементы и их соединения.

Выводы

Подвижность тяжелых металлов является ключевым параметром, определяющим экологическое состояние почв агроландшафтов. Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Оценка только валового содержания ТМ недостаточна; необходимо определение их подвижных форм, коррелирующих с биодоступностью.
2. Основными факторами, контролирующими подвижность, являются содержание гумуса, реакция среды (pH), гранулометрический состав и влажность почвы.
3. Почвы РСО-Алания (особенно выщелоченные черноземы и дерново-подзолистые почвы в промышленных зонах) характеризуются повышенным содержанием подвижных форм Zn, Pb, Cu и Cd, что требует организации постоянного мониторинга и разработки детоксикационных мероприятий.

4. Экологическая обстановка в Алагирском ущелье формируется под воздействием предприятий Садонского свинцово-цинкового комбината, занятых в горнодобыче, и сопутствующей им инфраструктуры, расположенной на поверхности. Наиболее существенное воздействие на состояние почв оказывают склады отходов обогащения.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка прогностических моделей поведения ТМ в системе «почва–растение» и поиск эффективных способов иммобилизации загрязнителей.

Литература

1. Алборов И.Д., Бадтиев Ю.С., Бадтиева Ф.К., Тедеева Ф.Г. Оценка экологической обстановки в районе Унальского хвостохранилища. // Вестник МАНЭБ. – 2011. – Т. 16. № 2. – С. 9–17.
2. Алборов И.Д., Бурдзиева О.Г., Закс Т.В., Кануков А.С. Геоэкологический мониторинг и ремедиация территории Моздокского нефтепродуктового загрязнения. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 1. – С. 127–140. DOI: 10.46698/VNC.2024.10.67.009.
3. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Ленинград: Агропромиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 140 с.
4. Джанаев З.Г. Изменение химического состава почв Северного Кавказа. // Агрохимический вестник. – 2008. – № 2. – С. 4–6.
5. Заалишвили В.Б., Кануков А.С., Корбесова К.В. Оценка влияния автомобильного движения транспорта на загрязнение урбанизированных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 4. – С. 135–146. DOI: 10.46698/VNC.2021.53.63.011.
6. Кануков А.С., Бурдзиева О.Г., Корбесова К.В., Дадтеева Э.В. Влияние микропластика на загрязнение почв тяжелыми металлами. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 4. – С. 197–210. DOI: 10.46698/a8396-0899-8665-m.
7. Наплекова Н.Н., Булавко Г.И. Ферментативная активность почв, загрязненных соединениями свинца. // Почвоведение. – 1983. – № 7. – С. 35–40.
8. Обухов А.И., Лепнёва О.М. Биогеохимия тяжелых металлов в городской среде. // Почвоведение. – 1989. – № 5. – С. 65–73.
9. Попов В.В., Соловьев Г.А. Контроль загрязнения почв тяжелыми металлами. // Химизация сельского хозяйства. – 1991. – № 11. – С. 80–82.
10. Снакин В.В., Кречетов П.П., Мельченко В.Е., Алябина И.О., Кузовникова Т.А., Степичев А.В. Оценка состояния почв и ландшафтов для целей экологического нормирования. / Биогеохимические основы экологического нормирования. М.: Наука, 1993. – С. 126–142.
11. Lu X.M., Lu P.Z., Liu X.P. Fate and abundance of antibiotic resistance genes on microplastics in facility vegetable soil. // Science of The Total Environment. – 2020. – Vol. 709. – Art. No. 136276.
12. Thinh N.V., Osanai Y., Do V.H., Nguyen T.A., Phuong N.M., Kien N.T. Removal of lead and other toxic metals in heavily contaminated soil using biodegradable chelators: GLDA, citric acid and ascorbic acid. // Chemosphere. – 2021. – Vol. 263. – Art. No. 127912. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127912.
13. Van Der Ploeg, Vlijm L. Ecological evolution, nature conservation and land use planning with particular reference to methods in Netherland. // Biologocal Conservation. – 1978. – Vol. 14. – pp. 197–221.
14. Wakkaf T., Allouche M., Harrath A.H., Mansour L., Alwasel S., Mohamed Thameemul Ansari K.G., Beyrem H., Sellami B., Boufahja F. The individual and combined effects of cadmium, polyvinyl chloride (PVC) microplastics and their polyalkylamines modified forms on meiobenthic features in a microcosm. // Environmental Pollution. – 2020. – Vol. 266. – Art. No. 115263.
15. Wang P., Sun Z., Hu Y., Cheng H. Leaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact. // Science of the Total Environment. – 2019. – Vol. 695. – Art. No. 133893. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133893.
16. Yu H., Hou J.H., Dang Q.L., Cui D.Y., Xi B.D., Tan W.B. Decrease in bioavailability of soil heavy metals caused by the presence of microplastics varies across aggregate levels. // Journal of Hazardous Materials. – 2020. – Vol. 395. – Art. No. 122690.
17. Yu H., Zhang Z., Zhang Y., Fan P., Xi B.D., Tan W.B. Metal type and aggregate microenvironment govern the response sequence of speciation transformation of different heavy metals to microplastics in soil. // Science of the Total Environment. – 2021. – Vol. 752. – Art. No. 141956.
18. Zhou Y.F., Liu X.N., Wang J. Ecotoxicological effects of microplastics and cadmium on the earthworm *Eisenia foetida*. // Journal of Hazardous Materials. – 2020. – Vol. 392. – Art. No. 122273.

References

1. Alborov I.D., Badtiyev Yu.S., Badtiyeva F.K., Tedeeva F.G. Assessment of the ecological situation in the area of the Unal tailings storage facility. *Vestnik of IAELPS*. 2011. Vol. 16. No. 2. pp. 9–17.
2. Alborov I.D., Burdzieva O.G., Zaks T.V., Kanukov A.S. Geo-ecological monitoring and remediation of the Mozdok area polluted by oil products. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 1. pp. 127–140. DOI: 10.46698/VNC.2024.10.67.009.
3. Alexeev Yu.V. Heavy metals in soils and plants. Leningrad. Agropromizdat. 1987. 140 p.
4. Dzhanayev Z.G. Changes in the chemical composition of soils in the North Caucasus. *Agrochemistry Bulletin*. 2008. No. 2. pp. 4–6.
5. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Korbesova K.V. Assessment of the Impact of Road Traffic on the Pollution of Urbanized Territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 135–146. DOI: 10.46698/VNC.2021.53.63.011.
6. Kanukov A.S., Burdzieva O.G., Korbesova K.V., Dadteyeva E.V. The impact of microplastics on soil contamination by heavy metals. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15, No. 4. pp. 197–210. DOI: 10.46698/a8396-0899-8665-m. (In Russ.)
7. Naplekova N.N., Bulavko G.I. Enzymatic activity of soils contaminated with lead compounds. *Soil Science*. 1983. No. 7. pp. 35–40.
8. Obukhov A.I., Lepneva O.M. Biogeochemistry of heavy metals in the urban environment. *Soil Science*. 1989. No. 5. pp. 65–73.
9. Popov V.V., Solovyov G.A. Control of soil contamination with heavy metals. *Chemization of Agriculture*. 1991. No. 11. pp. 80–82.
10. Snakin V.V., Krechetov P.P., Melchenko V.E., Alyabina I.O., Kuzovnikova T.A., Stepichev A.V. Assessment of the state of soils and landscapes for environmental regulation purposes. *Biogeochemical foundations of environmental regulation*. Moscow. Nauka. 1993. pp. 126–142.
11. Lu X.M., Lu P.Z., Liu X.P. Fate and abundance of antibiotic resistance genes on microplastics in facility vegetable soil. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 709. Art. No. 136276.
12. Thinh N.V., Osanai Y., Do V.H., Nguyen T.A., Phuong N.M., Kien N.T. Removal of lead and other toxic metals in heavily contaminated soil using biodegradable chelators: GLDA, citric acid and ascorbic acid. *Chemosphere*. 2021. Vol. 263. Art. No. 127912. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127912.
13. Van Der Ploeg, Vlijm L. Ecological evolution, nature conservation and land use planning with particular reference to methods in Netherland. *Biological Conservation*. 1978. Vol. 14. pp. 197–221.
14. Wakkaf T., Allouche M., Harrath A.H., Mansour L., Alwasel S., Mohamed Thameemul Ansari K.G., Beyrem H., Sellami B., Boufahja F. The individual and combined effects of cadmium, polyvinyl chloride (PVC) microplastics and their polyalkylamines modified forms on meiobenthic features in a microcosm. *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 266. Art. No. 115263.
15. Wang P., Sun Z., Hu Y., Cheng H. Leaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact. *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 695. Art. No. 133893. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133893.
16. Yu H., Hou J.H., Dang Q.L., Cui D.Y., Xi B.D., Tan W.B. Decrease in bioavailability of soil heavy metals caused by the presence of microplastics varies across aggregate levels. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 395. Art. No. 122690.
17. Yu H., Zhang Z., Zhang Y., Fan P., Xi B.D., Tan W.B. Metal type and aggregate microenvironment govern the response sequence of speciation transformation of different heavy metals to microplastics in soil. *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 752. Art. No. 141956.
18. Zhou Y.F., Liu X.N., Wang J. Ecotoxicological effects of microplastics and cadmium on the earthworm *Eisenia foetida*. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 392. Art. No. 122273.

УДК 911.2, 504.05, 551.582
DOI: 10.46698/VNC.2026.54.86.001

Оригинальная статья

Многолетние тренды температуры и осадков в горных и предгорных районах Северного Кавказа (на примере Северной Осетии)

В.Б. Заалишвили[✉], В.Ю. Тимченко[✉]

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

Статья поступила: 14.01.2026, доработана: 23.03.2026, принята к публикации: 25.03.2026

Резюме: Актуальность работы. Глобальные климатические изменения, анализируемые во всем мире, обуславливают научный интерес к различным характеристикам окружающей среды. Изменение температуры в горных районах увеличивает таяние ледников и ведет к изменению водного баланса в предгорьях и на равнинах. Многолетние изменения климатических условий Северной Осетии проявляются в увеличении средних значений температуры, изменении объема осадков. Такие сдвиги непосредственно влияют на общее состояние приземных слоев атмосферы, содержание в ней аэрозолей и многолетние вариации объемов растительной биомассы. **Целью** исследования является изучение свойств многолетних рядов температуры и количества осадков в горных, предгорных и равнинных районах Северной Осетии. **Методы.** Используется геопространственный отбор и статистическая обработка многолетних данных реанализа температуры и количества осадков. Анализируется отношение темпов изменения температуры к темпам изменения количества осадков. Определяется взаимосвязь отношения статистических параметров и высоты подстилающего ландшафта. **Результаты.** Показано, что для ряда районов на территории Северной Осетии отношение темпов изменения температуры к темпам изменения количества осадков варьируется в зависимости от высоты локации над уровнем моря. Для горных территорий это отношение самое высокое по модулю, при этом уклоны трендов температуры больше уклонов трендов количества осадков. Для равнинных районов Осетинской наклонной равнины и лесостепных ландшафтов в районе г. Моздока это отношение близко к единице. Полученное отношение может служить дополнительным параметром при идентификации горных, предгорных и равнинных районов и анализе геоэкологических изменений.

Ключевые слова: температура, количество осадков, статистические параметры, тренды, многолетние изменения, Северная Осетия.

Для цитирования: Заалишвили В.Б., Тимченко В.Ю. Многолетние тренды температуры и осадков в горных и предгорных районах Северного Кавказа (на примере Северной Осетии). *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 180-188. DOI: 10.46698/VNC.2026.54.86.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.54.86.001

Original paper

Long-term trends in temperature and precipitation in the mountainous and foothill regions of the North Caucasus (case study of the North Ossetia)

V.B. Zaalishvili^{ORCID}, V.Yu. Timchenko^{ORCID}

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

Received: 14.01.2026, revised: 23.03.2026, accepted: 25.03.2026

Abstract: Relevance. Global climate change, analyzed worldwide, leads to scientific interest in various environmental characteristics. Temperature changes in mountainous areas increase the melting of glaciers and lead to changes in the water balance in the foothills and plains. Long-term changes in the climatic conditions of North Ossetia are manifested in an increase in average temperatures and changes in precipitation. Such shifts directly affect the general condition of the surface layers of the atmosphere, its aerosol content and long-term variations in plant biomass volumes. **The aim** of this research is to study the properties of long-term temperature and precipitation ranges in mountainous, foothill and lowland regions of North Ossetia. **Methods.** Geospatial sampling and statistical processing of long-term temperature and precipitation reanalysis data are used. The ratio of the rate of temperature change to the rate of precipitation change is analyzed. The relationship between the ratio of statistical parameters and the height of the underlying landscape is determined. **Results.** It is shown that for a number of areas in North Ossetia, the ratio of the rate of temperature change to the rate of precipitation varies depending on the altitude of the location above sea level. For mountainous areas, this ratio is the highest in modulus, while the slopes of temperature trends are greater than the slopes of precipitation trends. For the lowland areas of the Ossetian sloping plain and forest-steppe landscapes in the Mozdok area, this ratio is close to unity. The obtained ratio can serve as an additional parameter in the identification of mountainous, foothill and lowland areas and the analysis of geoecological changes.

Keywords: temperature, precipitation, statistical parameters, trends, long-term changes, North Ossetia.

For citation: Zaalishvili V.B., Timchenko V.Yu. Long-term trends in temperature and precipitation in the mountainous and foothill regions of the North Caucasus (case study of the North Ossetia). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 180-188. DOI: 10.46698/VNC.2026.54.86.001

Введение

В последние десятилетия проблема изменений климата [Abbass et al., 2022; Asadi, 2005], которые на территории России протекают быстрее, чем в среднем по миру, сопряжена со значительным потенциальным ущербом для населения и экономики [Malhi, 2021].

В соответствии с данными доклада Росгидромета оценки линейного тренда температуры приземного воздуха, осредненной за 2024 год для Северо-Кавказского региона, составили $+0.51^{\circ}\text{C}/10$ лет. Потепление продолжалось по всей России в целом за 2024–2025 годы и во все сезоны. При этом в Южном федеральном округе преобладал дефицит осадков – он составил 74 % (Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год, Москва, Росгидромет, 2025). Предварительный анализ показал, что имеются такие же тенденции для всех районов Се-

верного Кавказа [Виноградова и др., 2015; Корчагина, 2019, 2024]. Более детальные исследования нами приведены для территории Северной Осетии.

Важным фактором, обуславливающим межгодовую динамику условий вегетации на Северном Кавказе, является фактор осадков [Ашабоков и др., 2021; Бисчоков, 2018]. Отмечается тесная зависимость между величиной межгодовой вариативности осадков [Zhu et al., 2022] и степенью их влияния на динамику растительного покрова.

Изменения прогнозов по температуре и количеству осадков учитываются при расчете экономической эффективности и отдачи мелиоративных мероприятий [Дезфули и др., 2020; Керимов и др., 2024 а,б; Бекмурзаева и др., 2025 а,б; Атаев, 2025; Мухартова и др., 2025], обеспечивающих воспроизводство и повышение плодородия при возрастающих геоэкологических рисках [Петрушина, 2023; Мячина и др., 2024; Аджиев, 2025].

Важную роль в понимании теплового баланса в атмосфере играет исследование содержания аэрозолей [Гинзбург и др., 2008; Floutsi et al., 2016; Levy et al., 2023]. Аэрозоли заметно рассеивают энергию излучения Солнца, являются важным регулятором радиационного баланса системы «атмосфера–подстилающая поверхность» [Чубарова и др., 2011]. Приоритетной задачей является определение тенденции многолетних изменений различных характеристик атмосферы с учетом пространственного распределения и сезонности [Кузьмина, 2007; Shivanna, 2023].

Настоящая работа является естественным развитием исследований, приведенных в работах [Каменецкий и др., 2021 а,б; Каменецкий, Радионов, 2024], для описания особенностей геоэкологического состояния Северной Осетии, где исследуется взаимосвязь параметров линейных моделей для температуры и количества осадков.

Методология и методы исследования

В качестве источника данных использованы многолетние ряды температуры и количества осадков по данным NASA POWER Data Access Viewer (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>). Ряды температуры и количества осадков состояли из ежедневных значений за многолетний период 2000–2019 гг. Для каждого года вычислялись интегральные характеристики I_n для температуры и количества осадков [Каменецкий и др., 2021 а,б]. Изучался ряд районов в горной, предгорной и равнинной части, имеющих различные типы ландшафтов (высокогорный, горно-лесистый, лесостепной и степной), для выявления вариаций индексов вегетации и аэрозольной оптической толщины в зависимости от температуры и количества осадков в зависимости от удаленности от горных хребтов.

Для выявления многолетних изменений проверялось предположение о линейной зависимости ряда I_n от времени в виде:

$$I_n = a \cdot t + b \quad (1)$$

где a – темпы изменения (уклон линии тренда), b – многолетнее среднее значение (у-пересечение линии), t – время от начала исследуемого периода.

Нами введен температурно-осадковый коэффициент, равный отношению уклона тренда I_n температуры к уклону тренда I_n осадков для исследуемого района.

Результаты и обсуждение

На основе таблиц интегральных характеристик для температуры и осадков из работ [Каменецкий и др., 2021 а,б] составлена таблица отношений уклонов тренда интегральной характеристики температуры к соответствующим уклонам тренда интегральной характеристики количества осадков (табл. 1). Упорядочим районы измерений по высоте над уровнем моря. Для наглядности отношения уклонов трендов

температуры к уклонам трендов количества осадков приведены в виде гистограммы на рисунке 1.

Можно отметить, что имеет место взаимосвязь между типом ландшафта и характерными для этого ландшафта значениями отношения уклонов трендов температуры к уклонам трендов количества осадков, которая формирует т.н. температурно-осадковый коэффициент.

Таблица 1 / Table 1

**Сводные значения отношений уклонов трендов Т к уклонам трендов осадков /
Summary values of the ratio of T trend slopes to precipitation trend slopes**

Локация / Location	Высота района/ Height of the area	Наклон линии регрессии Т / Slope of the regression line T	Наклон линии регрессии осадков/ Slope of the precipitation regression line	Отношение уклонов Т/осадки / Slope ratio T/ precipitation
Цей / Tsey	1900–2200	0,0926	-0,0352	-2,6306
Фиэгдон / Fiagdon	1200–1600	0,0769	-0,0307	-2,5049
Чикола / Chikola	650–1100	0,055	-0,0309	-1,7799
Гизель / Gizel	600–800	0,0445	-0,0294	-1,5136
Беслан / Beslan	500	0,0445	-0,0294	-1,5136
Владикавказ / Vladikavkaz	600–700	0,0445	-0,0294	-1,5136
Русское / Russkoe	130–160	0,0322	-0,0283	-1,1378
Виноградное / Vinogradnoye	130–160	0,025	-0,0276	-0,9058
Моздок / Mozdok	130	0,0251	-0,0277	-0,9061

Исходя из данных реанализа и спутниковых данных, тренды количества осадков по таблице 1 имеют отрицательный уклон. Тренды температуры по нашим расчетам имеют положительный уклон для всего Северо-Кавказского региона. Отсюда, температурно-осадковый коэффициент имеет отрицательный знак и его следует анализировать по модулю.

Для анализа данных в горной части республики выбран горнолыжный высокогорный курорт Цей, на высоте 1900–2200 м (над уровнем моря) и с. Фиэгдон с координатами 42°48'00" с.ш., 44°12'00" в.д. на высоте 1200–1600 м (над уровнем моря), расположенные на северных склонах Большого Кавказа. Для локаций, имеющих горный ландшафт, температурно-осадковый коэффициент наибольший по величине и составляет порядка 2,5.

Территории в районе с. Гизель и г. Владикавказа, расположены на 43°00'00" с.ш., 44°30'00" в.д.; высота над уровнем моря 600 ÷ 800 метров, растительность – смешанный хвойный и широколиственный лес. Территория в районе селения Чикола, РСО-Алания, 43°10'00" с.ш., 44°00'00" в.д.; высота составляет 650–1100 метров над уровнем моря; растительность – смешанные хвойные и широколиственные леса и сельхозугодья травянистых культур.

Локация на равнинной части вблизи г. Беслана, координаты 43°10'00" с.ш., 44°40'00" в.д., местность частично с холмистым и равнинным лесостепным ландшафтом. Высота над уровнем моря составляет около 500 метров.

Для районов, расположенных в предгорьях северной Осетии (Владикавказ, Чикола, Беслан) и имеющих горно-лесистый ландшафт, температурно-осадковый коэффициент по величине, варьирует в пределах порядка от 1,5 до 1,8.

Для Моздокского района (г. Моздок, с. Виноградное, с. Русское) температурно-осадковый коэффициент наименьший по величине и составляет порядка 0,9. Район с. Русское имеет координаты 43°50'00" с.ш., 44°20'00" в.д.; расположен на равнинной территории. Рельеф местности степной, высота над уровнем моря около 160 метров. Село Виноградное имеет координаты 43°40'00" с.ш., 44°40'00" в.д. Рельеф местности степной, высота над уровнем моря около 160 метров. Температурно-осадковый коэффициент для этих населенных пунктов составляет 0,9–1,1.

Анализ статистических взаимосвязей трендов температуры, трендов количества осадков с многолетними характеристиками аэрозольной оптической толщины, индексами вегетации формирует их корреляционные зависимости и приводится в соответствующих работах [Каменецкий и др., 2021 а,б]. Учитывая введенный температурно-осадковый коэффициент (рис. 1), характеризующий тот или иной тип ландшафтов, имеется возможность связывать уклоны трендов АОТ и NDVI напрямую со значениями этого коэффициента для выбранного ландшафта. Этот метод сократит количество параметров используемых линейных моделей, а также даст дополнительный критерий отнесения ландшафта вблизи горных хребтов к тому или иному типу.

Изменение со временем значения температурно-осадкового коэффициента является возможной причиной геоэкологической трансформации ландшафта, вызванной изменением климатических условий, сдвига баланса «изменение температуры – изменение количества осадков», что в многолетнем периоде характеризует изменение условий для благоприятного развития фитоценозов. При этом изменение трендов индекса вегетации при неизменном температурно-осадковом коэффициенте показывает наличие внешних причин для такого изменения, в том числе – наличие негативного антропогенного воздействия или деградацию растительного покрова.



Рис. 1. Температурно-осадковый коэффициент для горных, предгорных и равнинных районов РСО-Алания, иллюстрирующий таблицу 1 /

Fig. 1. Temperature-precipitation coefficient for mountainous, foothill and lowland regions of North Ossetia-Alania, illustrating Table 1

Вариативность многолетних значений аэрозольной оптической толщины имеет корреляционные связи с температурой, корреляция с количеством осадков для разных ландшафтов разнонаправлена [Каменецкий и др., 2021 а]. Следовательно, уклоны трендов АОТ также можно классифицировать по температурно-осадковому коэффициенту.

Температурно-осадковый коэффициент, как правило, строится на основе уклонов многолетних трендов интегральных характеристик температуры и количества осадков. При этом исследований по усредненным данным только одного года этого отношения явно недостаточно. В этой связи для выявления возможного изменения температурно-осадковых условий для ландшафта будет перспективным брать отношения уклонов трендов многолетнего ряда, например, за 20–25 лет или, в крайнем случае, за относительно короткий период, например, за 5 лет.

Выводы

На основе установленной взаимосвязи между типом ландшафта и характерными для этого ландшафта значениями отношения уклонов трендов температуры к уклонам трендов количества осадков введено понятие, т.н. температурно-осадкового коэффициента.

Установлена взаимосвязь между высотой ландшафта над уровнем моря и характерными для этого ландшафта значениями температурно-осадкового коэффициента. Показано, что температурно-осадковый коэффициент убывает с уменьшением высоты района над уровнем моря.

Для локаций, имеющих горный ландшафт, температурно-осадковый коэффициент наибольший по величине и составляет порядка 2,5. Для локаций, расположенных в предгорьях Северной Осетии и имеющих горно-лесистый ландшафт, температурно-осадковый коэффициент по величине варьирует порядка от 1,5 до 1,8. Для равнинных локаций температурно-осадковый коэффициент наименьший по величине и варьирует в пределах порядка от 0,9 до 1,0.

Температурно-осадковый коэффициент дает дополнительное описание геоэкологического состояния ландшафта и дополнительный критерий при геоэкологическом районировании. Изменение значения температурно-осадкового коэффициента произойдет в соответствии с вариациями климатических условий, когда тренды температур изменятся в ту или другую сторону по отношению к наблюдаемому количеству осадков в данном районе.

Литература

1. Аджиев А.Х., Кондратьева Н.В., Разумов В.В., Керефова З.М. Анализ многолетней динамики границ ледника Гарабаши. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 4. – С. 17–27. DOI: 10.46698/e6858-2115-8370-e.
2. Атаев З.В. Теоретико-методологические основы и региональные особенности выделения предгорных ландшафтов как самостоятельных геосистем. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 4. – С. 151–168. DOI: 10.46698/o0195-2486-7930-v.
3. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Кешева Л.А., Теунова Н.В. Изменения температурного режима и режима осадков теплого и холодного периодов в различных климатических зонах Северо-Кавказского региона. // Наука. Инновации. Технологии. – 2021. – № 3. – С. 55–72. DOI: 10.37493/2308-4758.2021.3.4.
4. Бекмурзаева Р.Х., Бекмурзаева Л.Р., Братков В.В. Террасирование склонов Макажойской котловины: оценка влияния рельефа методами лазерного сканирования. // Геология и геофизика Юга России. – 2025а. – Т. 15. № 4. – С. 169–183. DOI: 10.46698/v6676-0090-5271-g.
5. Бекмурзаева Л.Р., Братков В.В., Керимов И.А. Оценка изменения селитебной нагрузки на ландшафты Чеченской Республики по материалам дистанционного зондирования Земли.

// Геология и геофизика Юга России. – 2025б. – Т. 15. № 4. – С. 184–196. DOI: 10.46698/y5264-2026-3522-г.

6. Бисчоков Р.М. Прогнозирование изменений режима атмосферных осадков на Северном Кавказе. // Вестник Курганской ГСХА. – 2018. – № 1. – С. 14–17.

7. Виноградова В.В., Титкова Т.Б., Белоновская Е.А., Грачева Р.Г. Воздействие изменения климата на горные ландшафты Северного Кавказа. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12. № 6. – С. 35–47.

8. Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат. // Российский химический журнал. – 2008. – Т. 52. № 5. – С. 112–119.

9. Дезфули Э.Д., Зохраби Н., Розбахани М.М. Влияние изменения климата на температуру в провинции Хузестан. // Мелиорация и водное хозяйство. – 2020. – № 2. – С. 33–37.

10. Каменецкий Е.С., Радионов А.А. Математическое моделирование аэродинамики идеализированных горных ущелий. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 3. – С. 174–190. DOI: 10.46698/r8904-0498-0722-и.

11. Каменецкий Е.С., Радионов А.А., Тимченко В.Ю. Анализ спутниковых измерений вегетационного индекса в предгорных и равнинных районах РСО-Алания. // Мелиорация и водное хозяйство. – 2021 а. – № 4. – С. 32–38. DOI: 10.32962/0235-2524-2021-6-32-38.

12. Каменецкий Е.С., Радионов А.А., Тимченко В.Ю., Панаэтова О.С. Изменчивость аэрозольной оптической толщины в горных и предгорных районах Северной Осетии по данным спутниковых измерений. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2021 б. – № 3(211). – С. 51–63. DOI: 10.18522/1026-2237-2021-3-51-63.

13. Керимов И.А., Братков В.В., Бекмурзаева Л.Р. Динамика агроклиматических показателей степных ландшафтов Северного Кавказа по данным наземных наблюдений. // Геология и геофизика Юга России. – 2024а. – Т. 14. № 2. – С. 219–230. DOI: 10.46698/VNC.2024.92.31.017.

14. Керимов И.А., Эльжаев А.С., Додуев А.А. Дистанционный мониторинг лесных территорий (на примере эталонного участка «Рошни-Чу»). // Геология и геофизика Юга России. – 2024б. – Т. 14. № 4. – С. 180–191. DOI: 10.46698/VNC.2024.85.96.015.

15. Корчагина Е.А. Долгосрочные изменения режима атмосферных осадков как фактора формирования опасностей гидрологического характера в горной зоне Республики Дагестан. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 192–205. DOI: 10.46698/VNC.2024.81.30.016.

16. Корчагина Е.А. Исследование температурного режима в горных районах Кабардино-Балкарии и Карачаево-Черкесии в 1951–2015 гг. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2019. – Т. 11. № 4(42). – С. 449–458.

17. Кузьмина Ж.В. Анализ многолетних метеорологических трендов на юге России и Украины (от лесостепи до пустынь). // Аридные экосистемы. – 2007. – Т. 13. № 32. – С. 47–61.

18. Мухартова Ю.В., Ольчев А.В., Керимов И.А., Обаев Е.С. Усовершенствованный инверсионный метод восстановления потоков CO₂ над территориями со сложным рельефом на основе атмосферных измерений. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 4. – С. 235–248. DOI: 10.46698/v6610-9093-2069-х.

19. Мячина К.В., Керимов И.А., Ряхов Р.В., Дубровская С.А. Изучение поглотительной способности ландшафтов в отношении диоксида углерода с помощью ДДЗ (на примере степных, лесостепных и горнолесных регионов юга России). // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 1. – С. 141–151. DOI: 10.46698/VNC.2024.41.38.010.

20. Петрушина М.Н., Гуня А.Н., Колбовский Е.Ю., Пуреховский А.Ж., Динамика горных ландшафтов Северного Кавказа при современном изменении климата и усилении антропогенного воздействия. // Известия РАН. Серия Географическая. – 2023. – Т. 87. № 7. – С. 1032–1049.

21. Чубарова Н.Е., Горбаренко Е.В., Незваль Е.И., Шиловцева О.А. Аэрозольные и радиационные характеристики атмосферы во время лесных и торфяных пожаров в 1972, 2002 и 2010 гг. в Подмоскowie. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 47. № 6. – С. 790–804.

22. Abbass K., Qasim M.Z., Song H., Murshed M., Mahmood H., Younis I. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. // Environmental Science and Pollution Research. – 2022. – Vol. 29. – pp. 42539–42559. DOI: 10.1007/s11356-022-19718-6.

23. Asadi M.E. Effects of global climate change on water resources. // *Journal of Agricultural Meteorology*. – 2005. – Vol. 60. No. 5. – pp. 637–640. DOI: 10.2480/agrmet.637.
24. Floutsi A.A., Korras-Carraca M.B., Matsoukas C., Hatzianastassiou N., Biskos G. Climatology and trends of aerosol optical depth over the Mediterranean basin during the last 12 years (2002–2014) based on Collection 006 MODIS-Aqua data. // *Science of The Total Environment*. – 2016. – Vol. 551. No. 552. – pp. 292–303.
25. Levy R.C., Remer L.A., Shi Y., Kleidman R.G., The Dark Target Team. Characterizing aerosol from space with the moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) on the Terra and Aqua Satellites. In: *Handbook of Air Quality and Climate Change*. / Eds. H. Akimoto, H. Tanimoto. – Singapore: Springer, – 2023. pp. 271–294. DOI: 10.1007/978-981-15-2760-9_60.
26. Malhi G.S., Kaur M., Kaushik P. Impact of climate change on agriculture and Its mitigation strategies: a review. // *Sustainability*. – 2021. – Vol. 13. Issue 3. – pp. 1318–1339. DOI: 10.3390/su13031318.
27. Shivanna K.R. Climate change and its impact on biodiversity and human welfare. // *Proceedings of the Indian National Science Academy*. – 2022. – Vol. 88. Issue 2. – pp. 160–71. DOI: 10.1007/s43538-022-00073-6.
28. Zhu W., Wang S., Luo P., Zha X., Cao Z., Lyu J., Zhou M., He B., Nover D. A quantitative analysis of the influence of temperature change on the influence of temperature change on the extreme precipitation. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13. Issue 4. Art. No. 612. DOI: 10.3390/atmos13040612.

References

1. Adzhiev A.Kh., Kondratieva N.V., Razumov V.V., Kerefova Z.M. Analysis of the long-term Dynamics of the Garabashi glacier boundaries. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 4. pp. 17–27. DOI: 10.46698/e6858-2115-8370-e. (In Russ.)
2. Ataev Z.V. Theoretical and methodological foundations and regional specifics of delineating foothill landscapes as independent geosystems. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 4. 151–168. DOI: 10.46698/o0195-2486-7930-v. (In Russ.)
3. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Kesheva L.A., Teunova N.V. Changes in temperature and precipitation regimes during warm and cold periods in various climatic zones of the North Caucasus region. *Science. Innovations. Technologies*. 2021. No. 3. pp. 55–72. DOI: 10.37493/2308-4758.2021.3.4. (In Russ.)
4. Bekmurzaeva R.Kh., Bekmurzaeva L.R., Bratkov V.V. Terracing of the Makazhoy basin slopes: assessing the impact of relief using laser scanning methods. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025a. Vol. 15. No. 4. pp. 169–183. DOI: 10.46698/v6676-0090-5271-g. (In Russ.)
5. Bekmurzaeva L.R., Bratkov V.V., Kerimov I.A. Assessment of changes in the residential load on the landscapes of the Chechen Republic based on the remote sensing data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025b. Vol. 15. No. 4. pp. 184–196. DOI: 10.46698/y5264-2026-3522-r. (In Russ.)
6. Bischokov R.M. Forecasting changes in the atmospheric precipitation regime in the North Caucasus. *Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy*. 2018. No. 1. pp. 14–17. (In Russ.)
7. Vinogradova V.V., Titkova T.B., Belonovskaya E.A., Gracheva R.G. Impact of climate change on mountain landscapes of the North Caucasus. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2015. Vol. 12. No. 6. pp. 35–47. (In Russ.)
8. Ginzburg A.S., Gubanova D.P., Minashkin V.M. Influence of natural and anthropogenic aerosols on global and regional climate. *Russian Chemical Journal*. 2008. Vol. 52. No. 5. pp. 112–119. (In Russ.)
9. Dezfuli E.D., Zohrabi N., Rozbakhani M.M. Impact of climate change on temperature in Khuzestan province. *Land Reclamation and Water Management*. 2020. No. 2. pp. 33–37. (In Russ.)
10. Kamenetsky E.S., Radionov A.A. Numerical study of the idealized mountain gorges atmosphere. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 174–190. DOI: 10.46698/r8904-0498-0722-u. (In Russ.)
11. Kamenetsky E.S., Radionov A.A., Timchenko V.Yu. Analysis of satellite measurements of the vegetation index in the foothill and plain regions of the Republic of North Ossetia–Alania. *Land Reclamation and Water Management*. 2021a. No. 4. pp. 32–38. DOI: 10.32962/0235-2524-2021-6-32-38. (In Russ.)
12. Kamenetsky E.S., Radionov A.A., Timchenko V.Yu., Panaetova O.S. Variability of aerosol

optical depth in the mountain and foothill regions of North Ossetia based on satellite measurements. *University News. North-Caucasian Region. Natural Sciences Series*. 2021b. No. 3(211). pp. 51–63. DOI: 10.18522/1026-2237-2021-3-51-63. (In Russ.)

13. Kerimov I.A., Bratkov V.V., Bekmurzaeva L.R. Dynamics of agroclimatic indicators of steppe landscapes of the North Caucasus according to ground observations. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024a. Vol. 14. No. 2. pp. 219–230. DOI: 10.46698/VNC.2024.92.31.017. (In Russ.)

14. Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Doduev A.A. Remote monitoring of forest areas (using the example of the reference site “Roshni-Chu”). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024b. Vol. 14. No. 4. pp. 180–191. DOI: 10.46698/VNC.2024.85.96.015. (In Russ.)

15. Korchagina E.A. Long-term changes in the precipitation regime as a factor of the hydrological hazards’ formation in the mountainous zone of the Dagestan Republic. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 192–205. DOI: 10.46698/VNC.2024.81.30.016. (In Russ.)

16. Korchagina E.A. Study of the temperature regime in the mountainous regions of Kabardino-Balkaria and Karachay-Cherkessia in 1951–2015. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2019. Vol. 11. No. 4(42). pp. 449–458. (In Russ.)

17. Kuzmina Zh.V. Analysis of long-term meteorological trends in the south of Russia and Ukraine (from forest-steppe to deserts). *Arid Ecosystems*. 2007. Vol. 13. No. 32. pp. 47–61. (In Russ.)

18. Mukhartova I.V., Olchev A.V., Kerimov I.A., Obaev E.S. An improved inversion method for recovering CO₂ fluxes over complex terrain areas based on atmospheric measurements. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 4. pp. 235–248. DOI: 10.46698/v6610-9093-2069-x. (In Russ.)

19. Myachina K.V., Kerimov I.A., Rakhov R.V., Dubrovskaya S.A. Study of the landscape absorption capacity regarding to carbon dioxide using remote sensing data (steppe, forest-steppe and mountain-forest regions of Southern Russia as examples). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 1. pp. 141–151. DOI: 10.46698/VNC.2024.41.38.010. (In Russ.)

20. Petrushina M.N., Gunya A.N., Kolbovsky E.Yu., Purehovskiy A.Zh. Dynamics of mountain landscapes of the North Caucasus under modern climate change and increased anthropogenic impact. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2023. Vol. 87. No. 7. pp. 1032–1049. (In Russ.)

21. Chubarova N.E., Gorbarenko E.V., Nezval E.I., Shilovtseva O.A. Aerosol and radiation characteristics of the atmosphere during forest and peat fires in 1972, 2002, and 2010 in the region of Moscow. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. Vol. 47. No. 6. pp. 790–804. (In Russ.)

22. Abbass K., Qasim M.Z., Song H., Murshed M., Mahmood H., Younis I. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. pp. 42539–42559. DOI: 10.1007/s11356-022-19718-6.

23. Asadi M.E. Effects of global climate change on water resources. *Journal of Agricultural Meteorology*. 2005. Vol. 60. No. 5. pp. 637–640. DOI: 10.2480/agrmet.637.

24. Floutsi A.A., Korras-Carraca M.B., Matsoukas C., Hatzianastassiou N., Biskos G. Climatology and trends of aerosol optical depth over the Mediterranean basin during the last 12 years (2002–2014) based on Collection 006 MODIS-Aqua data. *Science of The Total Environment*. 2016. Vol. 551. No. 552. pp. 292–303.

25. Levy R.C., Remer L.A., Shi Y., Kleidman R.G., The Dark Target Team. Characterizing aerosol from space with the moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) on the Terra and Aqua Satellites. In: *Handbook of Air Quality and Climate Change*. Eds. H. Akimoto, H. Tanimoto. Singapore. Springer. 2023. pp. 271–294. DOI: 10.1007/978-981-15-2760-9_60.

26. Malhi G.S., Kaur M., Kaushik P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: a review. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Issue 3. pp. 1318–1339. DOI: 10.3390/su13031318.

27. Shivanna K.R. Climate change and its impact on biodiversity and human welfare. *Proceedings of the Indian National Science Academy*. 2022. Vol. 88. Issue 2. pp. 160–71. DOI: 10.1007/s43538-022-00073-6.

28. Zhu W., Wang S., Luo P., Zha X., Cao Z., Lyu J., Zhou M., He B., Nover D. A quantitative analysis of the influence of temperature change on the extreme precipitation. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13. Issue 4. Art. No. 612. DOI: 10.3390/atmos13040612.

УДК 504.06:622:669

DOI: 10.46698/VNC.2026.66.75.002

Оригинальная статья

Геоэкологическая оценка воздействия золотоизвлекающих фабрик на компоненты природной среды

Р.В. Ключев 

Московский политехнический университет, Россия, 107023, г. Москва,
ул. Б. Семеновская, 38, e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Статья поступила: 23.01.2026, доработана: 23.03.2026, принята к публикации: 25.03.2026

Резюме: Актуальность работы. Функционирование золотоизвлекающих фабрик (ЗИФ), использующих цианидное выщелачивание, создаёт значительную техногенную нагрузку на компоненты природной среды. Наибольшую опасность представляют эмиссии токсичных веществ в атмосферу и долговременное воздействие хвостохранилищ, что требует совершенствования методов геоэкологической оценки и защитных мероприятий. **Цель исследования.** Комплексная оценка воздействия технологических процессов ЗИФ на окружающую среду и обоснование инженерно-технических решений для минимизации негативных последствий. **Методы исследования.** Применены аналитический обзор и систематизация источников эмиссий, инструментальные замеры, расчётно-аналитический метод определения выделений вредных веществ, математическое моделирование пылеобразования, а также геоэкологическое прогнозирование поведения техногенных массивов. **Результаты.** Установлено, что основными загрязнителями являются циановодород (HCN), щелочные аэрозоли, хлор, оксиды азота и пыль, содержащая тяжёлые металлы. Представлена методика расчёта пылевых выбросов. Показано, что наибольшие геоэкологические риски смещаются в пострекультивационный период из-за активизации микробиологических процессов в хвостохранилищах. Обоснована необходимость перехода к сгущённым хвостам и долгосрочному геохимическому мониторингу. Предложен комплекс природоохранных мер, включающий герметизацию оборудования, хемосорбционную очистку газов и применение геосинтетических экранов. Главные выводы подтверждают, что обеспечение экологической безопасности ЗИФ достижимо лишь при сквозном проектировании защитных барьеров на всех этапах жизненного цикла предприятия. В качестве перспектив обозначены направления исследований по биорекультивации, цифровому мониторингу и снижению солесодержания оборотных вод.

Ключевые слова: геоэкология, золотоизвлекающая фабрика (ЗИФ), цианидное выщелачивание, хвостохранилища, загрязнение атмосферы, пылевые выбросы, циановодород (HCN), оборотное водоснабжение, геохимическая миграция, рекультивация.

Для цитирования: Ключев Р.В. Геоэкологическая оценка воздействия золотоизвлекающих фабрик на компоненты природной среды. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 189-203. DOI: 10.46698/VNC.2026.66.75.002

DOI: 10.46698/VNC.2026.66.75.002

Original paper

Geoecological assessment of the impact of gold extraction plants on the components of the natural environment

R.V. Klyuev 

Moscow Polytechnic University, 38 B. Semenovskaya, Moscow 107023,
Russian Federation, e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Received: 23.01.2026, revised: 23.03.2026, accepted: 25.03.2026

Abstract: Relevance. The operation of gold recovery plants (GRP) using cyanide leaching creates a significant technogenic load on the components of the natural environment. The greatest danger comes from toxic emissions into the atmosphere and the long-term impact of tailings ponds, which requires improved methods of geoecological assessment and protective measures. **Aim.** Comprehensive assessment of the impact of technological processes at the GRP on the environment and the justification of engineering and technical solutions to minimize the negative consequences. **Methods.** An analytical review and systematization of emission sources, instrumental measurements, a calculation and analytical method for determining the emissions of harmful substances, mathematical modeling of dust formation, and geoecological forecasting of the behavior of technogenic massifs were used. **Results.** It was established that the main pollutants are hydrogen cyanide (HCN), alkaline aerosols, chlorine, nitrogen oxides, and dust containing heavy metals. A methodology for calculating dust emissions is presented. It is shown that the greatest geoecological risks shift to the post-reclamation period due to the activation of microbiological processes in tailings storage facilities. The need for a transition to thickened tailings and long-term geochemical monitoring is substantiated. A set of environmental protection measures is proposed, including equipment sealing, chemisorption gas purification, and the use of geosynthetic screens. The key findings confirm that ensuring the environmental safety of the processing plant is achievable only through the comprehensive design of protective barriers at all stages of the plant's life cycle. Research areas such as bioreclamation, digital monitoring, and reducing the salinity of recycled water are identified as promising areas of research.

Keywords: geoecology, gold recovery plant (GRP), cyanide leaching, tailings, air pollution, dust emissions, hydrogen cyanide (HCN), water recycling, geochemical migration, reclamation.

For citation: Klyuev R.V. Geoecological assessment of the impact of gold extraction plants on the components of the natural environment. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 189-203. DOI: 10.46698/VNC.2026.66.75.002

Введение

Функционирование золотодобывающих комплексов, использующих цианидное выщелачивание руд, неизбежно создает техногенную нагрузку на гидросферу и приземный слой атмосферы в зоне влияния производства [Валиев и др., 2025].

Минимизация загрязнения водных объектов достигается комплексом мер: глубокая детоксикация отходов перед утилизацией, создание хвостохранилищ с изолирующими основаниями, предотвращающими инфильтрацию токсичных растворов в грунты, а также внедрение замкнутых систем водопользования с последующей очисткой оборотных вод [Голик, 2025; Конгар-Сюрюн, 2024].

Наибольшую опасность представляет постреабилитационная стадия. С течением времени защитные конструкции теряют герметичность, а токсичные компоненты, депонированные в лежалых хвостах, активизируются под действием гравитации и атмосферной влаги, формируя устойчивое вторичное загрязнение [Голик и др., 2025; Храпай и др., 2025]. В связи с этим геоэкологическое сопровождение горных проектов требует превентивного заложения бюджетов на консервацию объектов еще на этапе бизнес-планирования.

Ключевыми этапами ликвидационных работ являются химическая иммобилизация остаточных реагентов, перекрытие техногенных массивов изолирующими толщами, восстановление почвенного слоя и организация режимных геохимических наблюдений в течение длительного периода [Шабанов и др., 2023; Фоменко и др., 2024].

Резюмируя, минимизация геоэкологических последствий горного производства достижима лишь при сквозном анализе всех фаз существования комбината в контексте текущего состояния и буферной емкости литосферы [Маковозова и др., 2023].

Современная геоэкологическая ситуация смещает фокус внимания с локальной санации техногенных объектов на прогноз трансформации геохимического фона регионального масштаба. Критическим аспектом, не учтенным в традиционных проектах консервации, является активизация микробиологических сообществ в теле хвостохранилищ в постэксплуатационный период. Результаты натурных наблюдений показывают, что сульфатредуцирующие и тионовые бактерии способны катализировать перевод труднорастворимых форм металлов в мобильные состояния даже в условиях защелачивания среды, генерируя «кислотный дренаж» спустя десятилетия после рекультивации [Banerjee et al., 2020; Malyukova et al., 2023].

Кроме того, геоэкологическая оценка воздействия должна учитывать синергетический эффект наложения ореолов рассеяния от нескольких горнопромышленных центров в пределах одной металлогенической провинции. Кумулятивная эмиссия загрязнителей приводит к необратимой деградации геологической среды – истощению защитных свойств грунтовых толщ и потере ими сорбционных характеристик [Клюев и др., 2025; Скопинцева и др., 2025].

Методы

В работе применены следующие методы:

1. Аналитический обзор и систематизация технологических процессов ЗИФ для идентификации узлов эмиссии загрязняющих веществ [Зиновьева и др., 2022].
2. Инструментальные замеры и расчётно-аналитический метод для определения удельных выделений вредных веществ (HCN, NaOH, HCl, CO, NO₂, пыли) от оборудования [Босиков и др., 2025].
3. Математическое моделирование пылеобразования: расчёт массовых выбросов при пересыпке сыпучих материалов (с учётом коэффициентов дисперсности, влажности, ветровой нагрузки) и при аэрогенном уносе с открытых конвейеров [Kongar-Syuryun et al., 2025].
4. Геоэкологическое прогнозирование поведения техногенных массивов (хвостохранилищ) на основе оценки физико-химических и микробиологических процессов в лежалых хвостах [Nguyen et al., 2019; Куликова и др., 2024].
5. Сравнительный анализ технологических решений по складированию отходов (наливное, пастообразное, сгущённое) с оценкой их эффективности в различных климатических зонах [Клюев, 2024; Капанский, 2019].

Результаты

Характеристика загрязнителей атмосферы

При функционировании золотоизвлекательной фабрики (ЗИФ) формируются устойчивые очаги загрязнения воздушной среды. Генераторами взвешенных веществ являются технологические переделы, задействованные в рудоподготовке. К их числу относятся зона разгрузки и хранения сырья, дробильное отделение, вибропитатели, системы ленточных транспортеров и норий. Ключевыми точками рассеивания пылевых частиц служат стыковочные узлы оборудования: участки приема/сброса материала на дробилках и пересыпные желоба конвейерно-транспортной цепи [Offenberg, Ilias, 2019; Pochechun, Semyachkov, 2024].

В качестве примера на рисунке 1 приведены значения выбросов вредных веществ при работе агитатора с механическим перемешиванием.

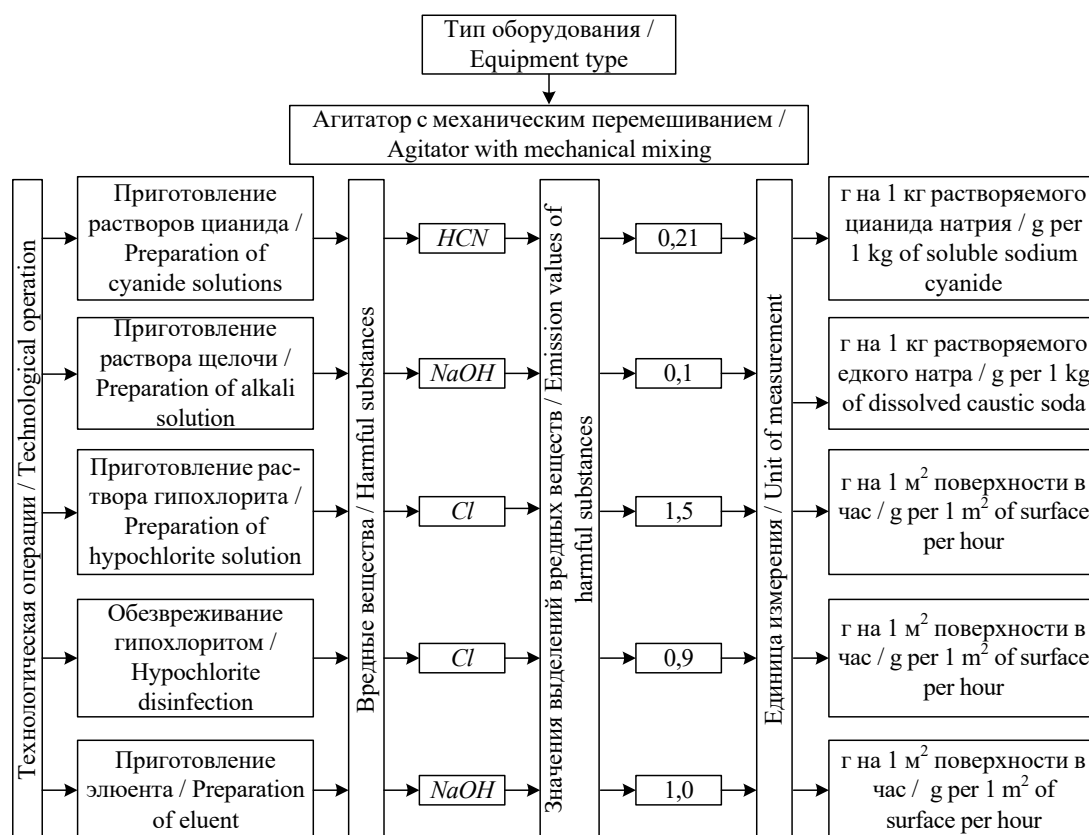


Рис. 1. Значения выбросов вредных веществ при работе агитатора с механическим перемешиванием /

Fig. 1. The Values of harmful emissions during operation of an agitator with mechanical mixing

Специфика пылевых выбросов ЗИФ заключается не только в механическом воздействии на прилегающие территории (изменение альбедо почв, угнетение растительности), но и в химическом составе аэрозолей. Пыль рудосодержащих пород часто обогащена сульфидами и сопутствующими элементами (мышьяк, сурьма, ртуть), что придает ей токсичные свойства. Ветровой перенос мелкодисперсных фракций способствует загрязнению почвенного покрова и поверхностных вод в радиусе до нескольких километров от промышленной площадки.

В связи с высокой миграционной способностью тонкодисперсной пыли особую значимость приобретает пылеподавление не только в камерах дробления, но и на открытых пересыпных станциях. Для снижения геоэкологической нагрузки

рекомендуется внедрение аспирационных систем с рукавными фильтрами на узлах перегрузки, а также применение систем сухого тумана в зонах открытого складирования руды. Комплексный подход к локализации источников пыления является приоритетным направлением минимизации техногенного воздействия предприятий горнорудной отрасли на компоненты природной среды [Tuomela et al., 2021; Wang et al., 2021].

Формирование газовоздушных выбросов на золотоизвлекательной фабрике дифференцировано по технологическим переделам. На участке дробления и классификации руды доминирующим поллютантом выступает взвешенная пыль, представленная частицами вмещающих пород и технологической извести. При переходе к измельчению в газовую среду начинают поступать летучие токсичные соединения, в частности циановодород, образующийся в условиях влажной механообработки. Дополнительным кратковременным источником залповых выбросов служит операция дозирования флокулянта в приемные бункеры флотационного отделения. На завершающей стадии цианирования непрерывное выделение синильной кислоты происходит с поверхности технологических емкостей, содержащих цианосодержащие пульпы и растворы.

С точки зрения геоэкологии важна не просто констатация факта выделения веществ, а **оценка их миграции, трансформации и воздействия на сопредельные среды.**

Особую геоэкологическую опасность представляет комбинированный характер эмиссий. Твердые частицы рудной пыли, оседая вблизи промплощадки, обогащают почвы тяжелыми металлами, тогда как газообразный циановодород способен к дальнему атмосферному переносу. В приземном слое атмосферы HCN относительно быстро фотолизируется, однако при абсорбции атмосферной влагой возможно формирование локальных зон подкисления осадков и вторичного загрязнения почв цианидами.

Учитывая, что открытые поверхности цианистых растворов являются постоянным источником выделения синильной кислоты (особенно в теплый период года при снижении pH среды), необходимо ранжирование мероприятий по снижению эмиссий.

На этапе рудоподготовки: герметизация укрытий дробилок и применение орошения с поверхностно-активными веществами ПАВ для связывания тонкодисперсных фракций известковой пыли.

На этапе реагентной обработки: замена пылящих порошковых флокулянтов на гранулированные формы или эмульсии, исключающие пыление при загрузке.

В отделении цианирования: внедрение укрытий «пловучих» типов над чанами сорбции и организация локальных отсосов воздуха с последующей очисткой от цианистого водорода методом хемосорбции.

Таким образом, снижение геоэкологической нагрузки ЗИФ возможно только при комплексном подходе к подавлению как твердых, так и газообразных поллютантов на всех стадиях переработки золотосодержащего сырья.

Технологическая линия десорбционно-электролитического узла характеризуется поликомпонентным составом газовоздушных эмиссий. На стадии приготовления десорбирующего раствора регистрируется поступление тонкодисперсного аэрозоля гидроокиси натрия, генерируемого с открытой поверхности реакторной емкости. В процессе десорбции благородных металлов из насыщенного сорбента термическая и химическая активация среды способствует переходу в паровую фазу как щелочного аэрозоля, так и циановодорода. Аналогичный спектр загрязнителей (едкий натр и HCN) фиксируется на электролизных ваннах в ходе катодного восстановления золо-

та. Заключительный передел – узел детоксикации технологических стоков и газов – генерирует эмиссии свободного хлора, а также пылевые частицы гипохлорита кальция и негашеной извести, поступающие в воздушную среду при загрузке реагентов.

С позиций геоэкологии особую значимость представляет **оценка суммарного риска** для приземного слоя атмосферы и трансграничного переноса высокотоксичных компонентов.

Высокая реакционная способность хлора и цианистого водорода определяет их активное участие в фотохимических превращениях атмосферных примесей. Присутствие HCN в выбросах даже в следовых концентрациях требует контроля, поскольку в условиях влажного воздуха и инсоляции возможны вторичные реакции с образованием стабильных токсикантов. Щелочные аэрозоли (NaOH), оседая вблизи промплощадки, изменяют pH почвенного покрова, вызывая подщелачивание и нарушая буферную емкость земель.

Эмиссии хлора, генерируемые в узле обезвреживания, отличаются высокой коррозионной активностью и биоцидным действием, что при неорганизованных выбросах ведет к подавлению микробоценозов в зоне влияния предприятия.

Для минимизации геоэкологической нагрузки на данном переделе рекомендуется:

- перевод процессов десорбции и электролиза на герметичное оборудование с организацией отсоса газов непосредственно от колонн и ванн;
- внедрение систем сухой или мокрой газоочистки с улавливанием HCN и щелочных аэрозолей методом абсорбции;
- на узле обезвреживания – замена пылящего гипохлорита кальция на жидкие формы реагентов, исключающие пылевой фактор, либо оснащение мест загрузки аспирацией с двухступенчатой фильтрацией.

Таким образом, десорбционно-электролитический цикл и сопряженные с ним системы обезвреживания формируют устойчивый ореол загрязнения, сочетающий кислотные, щелочные и цианосодержащие компоненты, что обосновывает необходимость внедрения замкнутых газоотводящих систем на данных участках.

Удельные выделения вредных веществ в атмосферу от технологических аппаратов и переделов для предложенной схемы переработки золотосодержащего сырья приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

**Выделения вредных веществ от технологических аппаратов /
Emissions of harmful substances from technological equipment**

Технологическая операция / Technological operation	Тип оборудования / Equipment type	Единица измерения / Unit of measurement	Вредное вещество / Harmful substance	Значение / Meaning
Приготовление растворов цианида / Preparation of cyanide solutions	Агитатор с механическим перемешиванием / Agitator with mechanical mixing	г на 1 кг растворимого цианида натрия / g per 1 kg of soluble sodium cyanide	HCN	0,21
Приготовление раствора щелочи / Preparation of alkali solution	Агитатор с механическим перемешиванием / Agitator with mechanical mixing	г на 1 кг растворимого едкого натра / g per 1 kg of dissolved caustic soda	NaOH	0,1
Цианирование / Cyanidation	Агитатор / Agitator	мг на 1 м ³ воздуха / mg per 1 m ³ of air	HCN	23,0

Контрольное грохочение цианидсодержащей пульпы / Control screening of cyanide-containing pulp	Сито барабанное / Drum sieve	г на 1 м ² поверхности в час / g per 1 m ² of surface per hour	HCN	0,9
Перекачка пульп при цианировании / Pumping pulps during cyanidation	Емкости, зумпфы / Tanks, sumps	г на 1 м ² поверхности в час / g per 1 m ² of surface per hour	HCN	0,3
Приготовление элюента / Preparation of eluent	Агитатор с механическим перемешиванием / Agitator with mechanical mixing	г на 1 м ² поверхности в час / g per 1 m ² of surface per hour	NaOH	1,0
Десорбция золота / Gold desorption	Емкость сброса давления / Pressure relief tank	г на 1 м ³ угля / g per 1 m ³ of coal	NaOH	21
Кислотная обработка / Acid treatment	Емкость раствора соляной кислоты / Capacity of hydrochloric acid solution	г на 1 м ² поверхности в час / g per 1 m ² of surface per hour	HCl	3,0
	Колонна кислотной обработки / Acid treatment column	г на 1 м ² поверхности в час / g per 1 m ² of surface per hour	HCl	1,1
Нейтрализация угля / Coal neutralization	Емкость раствора / Solution capacity	г на 1 м ² поверхности в час / g per 1 m ² of surface per hour	NaOH	1,0
Реактивация угля / Coal reactivation	Печь реактивации угля / Coal reactivation furnace	г на 1 м ³ угля / g per 1 m ³ of coal	CO	112
			NO ₂	219,6
Обжиг некондиционного угля / Roasting of substandard coal	Обжиговая печь / Kiln	г на 1 м ³ угля / g per 1 m ³ of coal	CO ₂	1800
			NO ₂	0,22
Электролиз / Electrolysis	Электролизер / Electrolyzer	г на 1 м ² поверхности в час / g per 1 m ² of surface per hour	HCN	1,0
		г на 1 м ³ раствора в час / g per 1 m ³ of solution per hour	NaOH	0,2
Приготовление раствора гипохлорита / Preparation of hypochlorite solution	Агитатор с механическим перемешиванием / Agitator with mechanical mixing	г на 1 м ² поверхности в час / g per 1 m ² of surface per hour	Cl	1,5
Обезвреживание гипохлоритом / Hypochlorite disinfection	Агитатор с механическим перемешиванием / Agitator with mechanical mixing	г на 1 м ² поверхности в час / g per 1 m ² of surface per hour	Cl	0,9
Загрузка извести / Loading lime	Приемный бункер / Receiving bin	г на кг извести / g per kg of lime	CaO (пыль) / CaO (dust)	1,1
Загрузка гипохлорита / Loading hypochlorite	Приемный бункер / Receiving bin	г на кг гипохлорита / g per kg hypochlorite	Гипохлорит (пыль) / Hypochlorite (dust)	0,8

При плавке электролизных осадков в газовую фазу выделяются пыль, кварц, бура, известь, сода, соединения меди (цинка) и свинца (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Выделения вредных веществ при плавке электролизных осадков /
Emissions of harmful substances during the smelting of electrolytic deposits**

Наименование вредных веществ / Name of harmful substances	Выделения в газовую фазу на 1 кг катодных осадков, г / Releases into the gas phase per 1 kg of cathode deposits, g
Окислы азота (в пересчете на NO ₂) / Nitrogen oxides (as NO ₂)	6,9
Меди оксид (в пересчете на медь) / Copper oxide (in terms of copper)	0,4
Цинка оксид (в пересчете на цинк) / Zinc oxide (in terms of zinc)	1,3
Сода кальцинированная / Soda ash	10,0
Бура (в пересчете на бор) / Borax (in terms of boron)	2,7

Параметры пылевого загрязнения

С геоэкологической точки зрения, эффективность всей системы защиты атмосферы напрямую зависит от корректности инженерных расчетов. Габаритные размеры и производительность газоочистных аппаратов определяются в первую очередь объемом подлежащей очистке газозооной смеси. Следовательно, обоснованный выбор конкретной модели оборудования возможен только после тщательного расчета объема и характеристик вентиляционных выбросов, что позволяет точно спроектировать локальный экологический барьер и прогнозировать остаточное воздействие на окружающую среду.

Таким образом, инженерно-технические решения по газоочистке, принимаемые на стадии проектирования, становятся фундаментальным элементом геоэкологической безопасности территории, обеспечивая сбалансированность между промышленным освоением недр и сохранением качества атмосферного воздуха как общепланетарного ресурса.

Представленный расчет пылевыделений базируется на важном геоэкологическом допущении: в рассматриваемых процессах механического дробления и транспортировки не задействованы химические реакции или высокотемпературные воздействия. Следовательно, в атмосферу не поступают специфические газообразные или парообразные токсиканты. Основным и практически единственным загрязняющим веществом в дробильно-транспортном контуре обогатительной фабрики является неорганическая пыль (взвешенные вещества), образующаяся в результате физического диспергирования горной массы в точках ее загрузки, разгрузки и перемещения.

Расчет интенсивности пылеобразования осуществляется на основе следующей математической модели:

1. Объем пылевых выбросов в процессе перегрузки сыпучего материала определяется по формуле:

$$Q = \frac{(10^6 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6 \cdot G \cdot B_1)}{3600}, \text{ г/с}, \quad (1)$$

где G – производительность технологического узла, где происходит пересыпка (т/ч);

k_1 – доля мелкодисперсной фракции (пылевой составляющей) в общей массе материала;

k_2 – коэффициент, отражающий долю пылевой фракции, которая способна перейти во взвешенное состояние;

k_3 – поправка на влияние локальных метеорологических условий (скорость ветра, турбулентность);

k_4 – коэффициент, учитывающий степень защиты места пересыпки от внешних воздействий (укрытие, ограждение);

k_5 – поправочный показатель, зависящий от влажности исходного материала;

k_6 – коэффициент, учитывающий гранулометрический состав и среднюю крупность частиц материала;

B_1 – безразмерный параметр, характеризующий влияние высоты свободного падения материала при пересыпке.

Данная формула позволяет количественно оценить пылевую эмиссию как ключевой параметр для проектирования природоохранных мероприятий.

2. Для оценки вторичного пылеобразования, связанного с воздействием ветра на движущиеся потоки сырья, используется следующая зависимость:

Интенсивность аэрогенного пылеуноса с открытой поверхности ленточного конвейера определяется по формуле:

$$Q = q \cdot B \cdot L \cdot k_1 \cdot k_2, \text{ г/с}, \quad (2)$$

где B – конструктивный параметр, ширина транспортерной ленты (м);

L – общая протяженность открытого участка конвейерной трассы, подверженного ветровому воздействию (м);

k_1 – коэффициент, корректирующий влияние фактической скорости ветра в районе размещения оборудования (м/с);

k_2 – поправочный коэффициент, учитывающий влагосодержание транспортируемого материала, влияющее на силу сцепления частиц.

Данная модель позволяет количественно оценить пылевой поток, формирующийся не за счет технологических перегрузок, а в результате эрозионного воздействия атмосферных явлений на открытые технологические линии, что является критически важным для проектирования мер по снижению фонового пылевого загрязнения территории.

Основы безопасности хвостохранилищ

Практика наливного складирования хвостов стала промышленным стандартом для большинства действующих золотодобывающих предприятий. При грамотном проектировании, строительстве и эксплуатации таких объектов в рамках комплексного природоохранного подхода их влияние на состояние окружающих геосистем может быть сведено к приемлемо низкому уровню.

Ключевой принцип геоэкологической безопасности данного метода заключается в создании замкнутого цикла обращения технологических вод. Организация хранения, при которой жидкая фаза хвостовой пульпы практически полностью вовлекается в систему оборотного водоснабжения фабрики, а строго контролируемый и подго-

товленный сброс возникает лишь при возникновении дебаланса объемов, формирует надежный гидрологический барьер [Панфилова и др., 2025]. Эта система эффективно изолирует потенциально загрязненные потоки, предотвращая их проникновение в поверхностные водотоки и грунтовые воды, и тем самым обеспечивает защиту гидросферы при штатной работе предприятия.

Детальное проектирование технологии размещения отходов обогащения должно быть выполнено в рамках стадии рабочего проектирования. Это требует проведения комплексных технико-экономических и экологических обоснований, базирующихся на всестороннем анализе исходных данных [Парада, 2024]. Критически важными для принятия решений являются сведения о текущем экологическом статусе территории, гидрологических режимах, климатических особенностях, а также прогноз возможных аварийных ситуаций с детализацией методов ликвидации их негативных последствий.

Однако даже при безаварийной эксплуатации наливное хвостохранилище остается потенциальным источником долговременного геоэкологического воздействия. Основные риски смещаются из фазы активной эксплуатации в пострекультивационный период. Формирование техногенных залежей тонкодисперсных минеральных осадков сопровождается процессами вторичного минералообразования, сорбции тяжелых металлов и их последующей мобилизации при изменении окислительно-восстановительных условий. Длительная консолидация илов, фильтрационная неоднородность лежащих хвостов, а также диффузионный массоперенос загрязнителей в грунтовые воды требуют включения в проектные решения мер долгосрочного пассивного контроля, не зависящих от наличия энергоснабжения и постоянного присутствия персонала.

К числу таких мер относится устройство противofильтрационных экранов из геосинтетических материалов с прогнозируемым сроком службы, сопоставимым со временем полного затухания геохимической активности складированных отходов. Дополнительно обосновано создание сети режимных наблюдательных скважин, закладываемых не только по периметру ограждающих дамб, но и по направлению вероятной миграции подземного потока. Мониторинг гидрогеохимических показателей должен осуществляться в непрерывном режиме с применением автоматизированных датчиков и дистанционной передачей данных в центры экологического контроля.

В последнее десятилетие наметился устойчивый тренд перехода от «пассивного» наливного складирования к частично-сухому и пастообразному укладыванию хвостов. Данная технология, интегрируемая на этапе реконструкции или нового строительства, позволяет сократить объемы складированной жидкой фазы на 30–50 %, снизить риски гидродинамических аварий и уменьшить площадь изымаемых земель. С позиций геоэкологии перевод хвостового хозяйства в режим сгущения и фильтрационного обезвоживания обеспечивает снижение фильтрационной нагрузки на грунты основания и сокращает эмиссию сероводорода и меркаптанов с водной поверхности хвостохранилища.

Вместе с тем практическая реализация таких решений требует учета региональной специфики. Для криолитозоны определяющее значение приобретает сохранение многолетнемерзлого состояния грунтов основания. Использование сезонно-охлаждающих устройств, проветриваемых насыпей и термостабилизаторов позволяет предотвратить термокарстовые просадки и деградацию мерзлоты. В аридных зонах, напротив, приоритетной задачей становится пылеподавление: закрепление пляжных зон и сухих карт полимерными составами, фитомелиорация с подбором солеустойчивых видов галофитов, а также применение ветрозащитных экранов и лесополос.

Наконец, современная парадигма геоэкологической безопасности предполагает переход от концепции «изоляции и захоронения» к концепции «хвосты как техноген-

ное месторождение». Комплексная переработка лежалых хвостов с доизвлечением ценных компонентов и переводом остаточной массы в инертное состояние – наиболее радикальный путь снижения накопленного экологического ущерба. Апробированные технологии кучного и чанового выщелачивания, магнитной и флотационной доводки уже сегодня позволяют вовлекать в оборот техногенные отходы прошлых лет, последовательно сокращая площадь геохимического загрязнения и снижая нагрузку на водные объекты.

Таким образом, обеспечение геоэкологической надежности хвостового хозяйства золотоизвлекательных фабрик достигается не единовременным проектным решением, а формированием адаптивной системы управления, охватывающей все этапы жизненного цикла – от выбора площадки до пострекультивационного мониторинга. Императивом выступает переход от формального соблюдения нормативов к научно-обоснованному прогнозированию поведения геотехнической системы в условиях многолетней динамики природных и техногенных факторов.

Обсуждение результатов

Полученные результаты полностью подтверждают исходную гипотезу о том, что золотоизвлекательные фабрики формируют устойчивое поликомпонентное загрязнение, при этом наибольшая геоэкологическая опасность связана не столько с текущей эксплуатацией, сколько с долговременными последствиями функционирования хвостохранилищ. Вопреки традиционному подходу, рассматривающему постэксплуатационную стадию как период затухания активности, исследование доказывает, что именно в этот период происходит активизация сульфатредуцирующих бактерий, способствующая переводу тяжёлых металлов в мобильные формы. Это требует пересмотра нормативных сроков мониторинга и включения в проекты биогеохимических барьеров.

Количественные значения эмиссий, систематизированные в таблицах, наглядно демонстрируют, что узлы десорбции, электролиза и реактивации угля генерируют наиболее широкий спектр токсикантов, включая синильную кислоту и свободный хлор. Выявленное несоответствие: при высоких значениях выделений HCN с поверхности чанов (до 23 мг/м³) проектные решения зачастую ограничиваются локальными укрытиями без химической очистки. Это указывает на необходимость внедрения абсорбционных систем как обязательного элемента.

Предложенная методика расчёта пылевых выбросов, основанная на многофакторной модели (крупность, влажность, высота пересыпки, скорость ветра), позволяет более точно прогнозировать зоны рассеивания пыли. Её применение на стадии проектирования даёт возможность оптимизировать размещение аспирационных установок и минимизировать санитарно-защитную зону.

Интерпретация данных по хвостохранилищам подтверждает гипотезу о необходимости перехода от концепции «захоронения» к концепции «техногенного месторождения». Доизвлечение золота из лежалых хвостов не только экономически целесообразно, но и снижает объём токсичной массы, подлежащей изоляции. Однако данный подход требует дифференциации: в криолитозоне приоритетом остаётся термостабилизация грунтов, в аридных зонах – пылеподавление и фитомелиорация.

Таким образом, соответствие полученных результатов гипотезе полное, при этом выявлены новые факторы риска (микробиологическая активизация, синергизм ореолов рассеяния), ранее не учитываемые в типовых проектах. Полученные данные формируют основу для перехода к адаптивному управлению геотехническими системами.

Предложения по продолжению исследований

1. Разработка методов повышения качества очистки сбросных вод.
2. Модернизация составов реагентов для детоксикации цианидов.
3. Повышение работоспособности геомембран в агрессивной среде.
4. Детализация процессов миграции загрязняющих веществ.
5. Разработка технологий биологической рекультивации хвостохранилищ.
6. Оптимизация систем мониторинга и прогнозирования аварий.

Выводы

Функционирование золотоизвлекательных фабрик (ЗИФ), использующих цианидное выщелачивание, формирует устойчивую поликомпонентную геоэкологическую нагрузку на атмосферу, гидросферу и почвы. Основными загрязнителями являются циановодород (HCN), щелочные аэрозоли, хлор, оксиды азота и пыль, содержащая тяжелые металлы.

Установлено, что узлы десорбции, электролиза и реактивации угля генерируют наиболее широкий спектр токсикантов. При высоких значениях выделений HCN с поверхности технологических емкостей (до 23 мг/м³) проектные решения часто ограничиваются локальными укрытиями без химической очистки, что обосновывает необходимость внедрения абсорбционных систем как обязательного элемента.

Обоснована необходимость перехода от концепции «пассивного захоронения» хвостов к их переработке как техногенных месторождений с доизвлечением ценных компонентов и переводом остаточной массы в инертное состояние. Это наиболее радикальный путь снижения накопленного экологического ущерба, требующий дифференцированного подхода: в криолитозоне приоритетом является термостабилизация грунтов, в аридных зонах – пылеподавление и фитомелиорация.

Обеспечение геоэкологической безопасности золотоизвлекательных фабрик достижимо лишь при сквозном проектировании защитных барьеров на всех этапах жизненного цикла предприятия – от выбора площадки до пострекультивационного мониторинга – с переходом от формального соблюдения нормативов к научно-обоснованному прогнозированию поведения геотехнических систем.

Литература

1. Босиков И.И., Силаев И.В., Кузина А.В., Мишедченко А.А. Комплексный анализ свойств критерия эффективности задачи синтеза технических систем воздухообеспечения на угольных шахтах. // Уголь. – 2025. – № 5. – С. 128–131. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-128-131.
2. Валиев Н.Г., Голик В.И., Лебзин М.С. Инертность влияния стоков Тырныаузского вольфрамо-молибденового комбината на гидросистемы Северного Кавказа. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 1-1. – С. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_5.
3. Голик В.И. Снижение риска загрязнения экосистем при добыче руд в горных регионах // Экология и промышленность России. – 2025. – Т. 29. – № 9. – С. 36–39. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-9-36-39.
4. Голик В.И., Лукьянов В.Г., Хашева З.М. Обоснование возможности и целесообразности использования хвостов обогащения руд для изготовления твердеющих смесей. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. № 5. – С. 6–14.
5. Зиновьева О.М., Колесникова Л.А., Меркулова А.М., Смирнова Н.А. Управление экологическими рисками на горнодобывающих предприятиях. // Уголь. – 2022. – № 3. – С. 76–80. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-3-76-80.
6. Капанский А.А. Методы решения задач оценки и прогнозирования энергетической эффективности. // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – Т. 11. № 2(42). – С. 103–115.

7. Ключев Р.В. Анализ надежности элементов системы электроснабжения карьеров. // Горные науки и технологии. – 2024. – Т. 9. № 2. – С. 183–194. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-03-254.
8. 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. – Т. 15. № 1. – С. 194–207. DOI: 10.46698/VNC.2025.80.31.016.
9. Конгар-Сюрюн Ч.Б. Влияние шахтной воды на прочностные характеристики искусственного массива, созданного на основе техногенных отходов. // Уголь. – 2024. – № 12. – С. 75–78. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-75-78.
10. Куликова Е.Ю., Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Геоэкологический мониторинг при ведении горных работ. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. № 2. – С. 580–588. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588.
11. Маковозова З.Э., Соколов А.А., Фоменко В.А., Сарбаева М.Т. Влияние гидрогеологических особенностей Унальского хвостохранилища на загрязнение экосистемы тяжелыми металлами. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 6. – С. 126–138. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_126.
12. Панфилова Т.А., Кукарцев В.В., Худякова Е.В., Степанцевич М.Н., Красовская Л.В. Геофизическая оценка эффективности цеолитсодержащих барьеров для защиты вод от загрязнения на горнопромышленных территориях. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 3. – С. 211–225. DOI: 10.46698/VNC.2025.44.49.001.
13. Парада С.Г. Геолого-экономическая оценка золотоносных руд черносланцевого типа на примере Малка-Муштинского рудного узла (Кабардино-Балкарская республика). // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 142–151. DOI: 10.46698/VNC.2024.92.56.012.
14. Скопинцева О.В., Пернебек Б.П., Федоткин И.О. Повышение эффективности пылеподавления тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле цехов углеподготовки. // Безопасность труда в промышленности. – 2025. – № 12. – С. 61–66. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-12-61-66.
15. Фоменко В.А., Лолаев А.Б., Соколов А.А., Кузь О.В., Плахотин Д.А. Отдельные результаты геоэкологического мониторинга рельефа поверхности Унальского хвостохранилища. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 8. – С. 38–50. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_38.
16. Храпай Е.С., Колесников С.И., Кузина А.А. Оценка загрязнения почвы тяжелыми металлами в зоне влияния хвостохранилища Урупского горно-обогатительного комбината с использованием широкого спектра экологических индексов. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17. № 1. – С. 338–349. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-338-349.
17. Шабанов М.В., Маричев М.С., Манджиева С.С., Соколов А.А. Формирование хемоземов в условиях длительного воздействия аэропромышленных выбросов горно-металлургического комбината. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. № 3. – С. 727–740. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-727-740.
18. Banerjee B.P., Raval S., Maslin T.J., Timms W. Development of a UAV-mounted system for remotely collecting mine water samples. // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2020. – No. 34(6). – pp. 385 – 396. DOI: 10.1080/17480930.2018.1549526.
19. Kongar-Syuryun C., Babyr N., Klyuev R., Khayrutdinov M., Zaalishvili V., Agafonov V. Model for assessing efficiency of processing geo-resources, providing full cycle for development-case study in Russia. // Resources. – 2025. – No. 14(3). – Art. No. 51. DOI: 10.3390/resources14030051.
20. Malyukova L.S., Martyushev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V., Konyukhov V.Yu., Bashmur K.A., Panfilova T.A., Brigida V.S. Circular mining wastes management for sustainable production of camellia sinensis (L.) o. kuntze. // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. No. 15. – Art. No. 11671. DOI: 10.3390/su151511671.
21. Nguyen Q., Kitchener R., Bradshaw C. Investigation, monitoring and management of downstream groundwater in the tailings storage facilities of Nui Phao mine, Vietna. // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2019. – No. 231. – pp. 35–45. DOI: 10.2495/WM180041.
22. Offenbergh I., Ilias N. Geoecological monitoring in extraction process of soluble minerals from underground deposits. // International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying

Geology and Mining Ecology Management Sgem. – 2019. – Vol. 19(5.2). DOI: 10.5593/sgem2019/5.2/S20.050.

23. Pochechun V.A., Semyachkov A.I. Practical application of groundwater regime monitoring at middle Ural deposits the practice of application of the results of regulatory observations for groundwater at the fields of the middle Urals. // *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences.* – 2024. – Part F3514. – pp. 171 – 181. DOI: 10.1007/978-3-031-64423-8_15.

24. Tuomela A., Ronkanen A.-K., Rossi P.M., Rauhala A., Haapasalo H., Kujala K. Using geomembrane liners to reduce seepage through the base of tailings ponds – a review and a framework for design guideline. // *Geosciences (Switzerland).* – 2021. – No. 11(2). – pp. 1–23. DOI: 10.3390/geosciences11020093.

25. Wang Y., Zhang N., Chen, X. A short-term residential load forecasting model based on lstm recurrent neural network considering weather features. // *Energies.* – 2021. – Vol. 14. – Art. No. 2737. DOI: 10.3390/en14102737.

References

1. Bosikov I.I., Silaev I.V., Kuzina A.V., Mishedchenko A.A. Comprehensive analysis of the properties of the efficiency criterion for the synthesis of technical air supply systems for coal mines. *Ugol'.* 2025. No. 5. pp. 128–131. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-128-131. (In Russ.)

2. Valiev N.G., Golik V.I., Lebzin M.S. Inertness of influence exerted by effluents of Tyrnyauz Tungsten–Molybdenum Plant on hydrological systems of the North Caucasus. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2025. No. 1-1. pp. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_5. (In Russ.)

3. Golik V.I. Reducing the risk of ecosystem pollution from mining in mountainous regions. *Ecology and Industry of Russia.* 2025. Vol. 29. No. 9. pp. 36–39. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-9-36-39. (In Russ.)

4. Golik V.I., Lukyanov V.G., Khasheva Z.M. Substantiation of the possibility and expediency of using ore dressing tailings for the manufacture of hardening mixtures. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering.* 2015. Vol. 326. No. 5. pp. 6–14. (In Russ.)

5. Zinovieva O.M., Kolesnikova L.A., Merkulova A.M., Smirnova N.A. Environmental risk management at mining enterprises. *Ugol'.* 2022. No. 3. pp. 76–80. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-3-76-80. (In Russ.)

6. Kapansky A.A. Methods for solving the problems of evaluation and forecasting energy efficiency. *Kazan State Power Engineering University Bulletin.* 2019. Vol. 11. No. 2(42). pp. 103–115. (In Russ.)

7. Klyuev R.V. Reliability analysis of open-pit power supply system components. *Mining Science and Technology (Russia).* 2024. Vol. 9. No. 2. pp. 183–194. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-03-254. (In Russ.)

8. 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. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2025. Vol. 15. No. 1. pp. 194–207. DOI: 10.46698/VNC.2025.80.31.016. (In Russ.)

9. Kongar-Syuryun Ch.B. Influence of mine water on the strength of artificial mass based on industrial waste. *Ugol'.* 2024. No. 12. pp. 75–78. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-75-78. (In Russ.)

10. Kulikova E.Yu., Balovtsev S.V., Skopintseva O.V. Geoecological monitoring during mining operations. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2024. Vol. 16. No. 2. pp. 580–588. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588. (In Russ.)

11. Makovozova Z.E., Sokolov A.A., Fomenko V.A., Sarbaeva M.T. Influence of hydrogeology at Unal tailings pond on ecosystem pollution with heavy metals. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2023. No. 6. pp. 126–138. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_126. (In Russ.)

12. Panfilova T.A., Kukartsev V.V., Khudyakova E.V., Stepantsevich M.N., Krasovskaya L.V. Geophysical assessment of the efficiency of zeolite-containing barriers for water protection in mining areas. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2025. Vol. 15. No. 3. pp. 211–225. DOI: 10.46698/VNC.2025.44.49.001. (In Russ.)

13. Parada S.G. Geological and economic assessment of gold-bearing ores of the black shale type on the example of the Malka-Mushtinsky ore node (Kabardino-Balkarian republic).

Geology and Geophysics of Russian South. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 142–151. DOI: 10.46698/VNC.2024.92.56.012. (In Russ.)

14. Skopintseva O.V., Pernebek B.P., Fedotkin I.O. Improving the efficiency of dust suppression of fine fractures in dust aerosols of coal preparation shops. *Occupational Safety in Industry*. 2025. No. 12. pp. 61–66. DOI: 10.24000/04092961-2025-12-61-66. (In Russ.)

15. Fomenko V.A., Lolaev A.B., Sokolov A.A., Kuz O.V., Plakhotin D.A. Selected results of geocological monitoring of Unal tailings dump topography. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024. No. 8. pp. 38–50. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_38. (In Russ.)

16. Khrapai E.S., Kolesnikov S.I., Kuzina A.A. Assessment of soil pollution with heavy metals in the area of tailings dump influence of the Urup mining and processing plant using a wide range of environmental indices. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025. Vol. 17. No. 1. pp. 338–349. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-338-349. (In Russ.)

17. Shabanov M.V., Marichev M.S., Mangiyeva S.S., Sokolov A.A. Chemozem formation under conditions of prolong exposure to aero-industrial emissions from a mining and smelting plant. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023. Vol. 15. No. 3. pp. 727–740. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-727-740. (In Russ.)

18. Banerjee B.P., Raval S., Maslin T.J., Timms W. Development of a UAV-mounted system for remotely collecting mine water samples. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2020. No. 34(6). pp. 385–396. DOI: 10.1080/17480930.2018.1549526.

19. Kongar-Syuryun C., Babyr N., Klyuev R., Khayrutdinov M., Zaalishvili V., Agafonov V. Model for assessing efficiency of processing geo-resources, providing full cycle for development-case study in Russia. *Resources*. 2025. No. 14(3). Art. No. 51. DOI: 10.3390/resources14030051.

20. Malyukova L.S., Martyushev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V., Konyukhov V.Yu., Bashmur K.A., Panfilova T.A., Brigida V.S. Circular mining wastes management for sustainable production of camellia sinensis (L.) o. Kuntze. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 15. Art. No. 11671. DOI: 10.3390/su151511671.

21. Nguyen Q., Kitchener R., Bradshaw C. Investigation, monitoring and management of downstream groundwater in the tailings storage facilities of Nui Phao mine, Vietna. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2019. No. 231. pp. 35–45. DOI: 10.2495/WM180041.

22. Offenbergl I., Ilias N. Geoecological monitoring in extraction process of soluble minerals from underground deposits. *International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying Geology and Mining Ecology Management Sgem*. 2019. Vol. 19(5.2). DOI: 10.5593/sgem2019/5.2/S20.050.

23. Pochechun V.A., Semyachkov A.I. Practical application of groundwater regime monitoring at middle Ural deposits the practice of application of the results of regulatory observations for groundwater at the fields of the middle Urals. *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. 2024. Part F3514. pp. 171–181. DOI: 10.1007/978-3-031-64423-8_15.

24. Tuomela A., Ronkanen A.-K., Rossi P.M., Rauhala A., Haapasalo H., Kujala K. Using geomembrane liners to reduce seepage through the base of tailings ponds—a review and a framework for design guideline. *Geosciences (Switzerland)*. 2021. No. 11(2). pp. 1–23. DOI: 10.3390/geosciences11020093.

25. Wang Y., Zhang N., Chen, X. A short-term residential load forecasting model based on lstm recurrent neural network considering weather features. *Energies*. 2021. Vol. 14. Art. No. 2737. DOI: 10.3390/en14102737.

УДК 911.9:528.8

DOI: 10.46698/VNC.2026.36.64.001

Оригинальная статья

Пространственно-временной анализ геоэкологического состояния атмосферы Чеченской Республики на основе спутниковых данных

К.В. Мячина^{1,2}, И.А. Керимов²

¹ Институт степи УрО РАН ОФИЦ УрО РАН, Россия, 460000, г. Оренбург,
ул. Пионерская, 11, e-mail: oxprin@yandex.ru;

² Грозненский государственный нефтяной технический университет
им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, 100

Статья поступила: 02.02.2026, доработана: 24.03.2026, принята к публикации: 26.03.2026

Резюме: Актуальность работы. Состав атмосферы оказывает влияние на климатические процессы, усиливая или смягчая действие парниковых газов. Природно-географические условия региона и уровень его промышленного развития влияют на динамику и взаимодействие постоянных и временных компонентов атмосферы, включая антропогенные примеси. **Задачи исследования:** выявить особенности пространственно-временных изменений некоторых компонентов атмосферы Чеченской Республики; проанализировать содержание парниковых газов и иных антропогенных примесей в атмосфере в связи с характеристиками высоты аэрозольного слоя и содержанием озона; определить пространственно-временные тренды компонентов атмосферы региона в привязке к его ландшафтно-экологическим зонам. **Методы.** Методом графического сопоставления анализировались переменные компоненты состава атмосферы (аэрозоли, озон), парниковые газы (водяной пар, диоксид углерода, метан), антропогенные загрязнители (диоксид азота, оксид брома, глиоксаль, формальдегид). Для получения данных о содержании указанных веществ использовались продукты спутников Sentinel-5P и OCO. **Результаты.** Максимальное содержание водяного пара отмечается в центральной и северной равнинных частях региона, минимальное – в горных и предгорных районах. Максимальные значения диоксида углерода прослеживаются в равнинных полупустынных и степных северных районах. Между содержаниями диоксида углерода и водяного пара существует обратная зависимость. Прослеживается прямая зависимость между содержаниями диоксида углерода, озона и высотой аэрозольного слоя во всех ландшафтно-экологических зонах, независимо от ранга антропогенной нагрузки. Между содержаниями водяного пара и озона отмечается обратная зависимость. Максимальные показатели метана наблюдаются в атмосфере предгорья и равнинно-степного северного района. Озон и оксид брома в атмосфере Чеченской Республики распределены практически равномерно, а максимальные концентрации диоксида азота наблюдаются в северных равнинных районах. Глиоксаль и формальдегид показывают более высокие концентрации в северных степных районах. Между содержаниями формальдегида и глиоксаля прослеживается прямая зависимость на фоне обратной зависимости между этими двумя компонентами и диоксидом азота, оксидом брома и озоном. Выявлена прямая зависимость между содержаниями диоксида азота, оксида брома и озона. Для этих трех веществ прослеживается обратная связь с содержанием водяного пара. В регионе отмечаются устойчивые тенденции, соответствующие общемировым, к повышению концентрации диоксида углерода и метана и к снижению содержания водяного пара в атмосфере.

Ключевые слова: спутниковые данные, парниковые газы, компоненты химического состава атмосферы, антропогенные примеси, пространственно-временная динамика, ландшафтно-экологические зоны, ранг антропогенной нагрузки, Чеченская Республика.

Благодарности: Работа выполнена в рамках гос. задания ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова FZNU-2024-0002.

Для цитирования: Мячина К.В., Керимов И.А. Пространственно-временной анализ геоэкологического состояния атмосферы Чеченской Республики на основе спутниковых данных. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 204-216. DOI: 10.46698/VNC.2026.36.64.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.36.64.001

Original paper

Spatial and temporal analysis of the geoecological state of the Chechen Republic atmosphere based on satellite data

K.V. Myachina^{1,2}, I.A. Kerimov²

¹ Steppe Institute, Ural Branch Russian Academy of Sciences, Orenburg Federal Research Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,

11 Pionerskaya Str., Orenburg 460000, Russian Federation,
e-mail: oxprin@yandex.ru;

² Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov,
100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 364051, Russian Federation

Received: 02.02.2026, revised: 24.03.2026, accepted: 26.03.2026

Abstract: Relevance. The composition of the atmosphere influences climate processes by enhancing or mitigating the effects of greenhouse gases. The natural and geographical conditions of the region and the level of its industrial development affect the dynamics and interaction of permanent and temporary components of the atmosphere, including anthropogenic impurities. **Research objectives:** to identify the features of spatiotemporal changes in some components of the atmosphere of the Chechen Republic; to analyze the content of greenhouse gases and other anthropogenic impurities in the atmosphere in connection with the characteristics of the aerosol layer height and ozone content; to determine the spatial and temporal trends of the atmospheric components of the region in relation to its landscape and ecological zones. **Methods.** The variable components of the atmospheric composition (aerosols, ozone), greenhouse gases (water vapor, carbon dioxide, methane), anthropogenic pollutants (nitrogen dioxide, bromine oxide, glyoxal, formaldehyde) were analyzed by graphical comparison. To obtain data on the content of these substances, Sentinel-5P and OCO satellite products were used. **Results.** The maximum water vapor content is observed in the central and northern lowland parts of the region, the minimum – in mountainous and foothill areas. The maximum values of carbon dioxide can be traced in the lowland semi-desert and steppe northern regions. There is an inverse relationship between the content of carbon dioxide and water vapor. There is a direct relationship between the content of carbon dioxide, ozone and the height of the aerosol layer in all landscape-ecological zones, regardless of the rank of anthropogenic impact. There is an inverse relationship between the content of water vapor and ozone. The maximum methane levels are observed in the atmosphere of the foothills and the lowland-steppe northern region. Ozone and bromine oxide in the atmosphere of the Chechen Republic are distributed almost evenly, and the maximum concentrations of nitrogen dioxide are observed in the northern lowland regions. Glyoxal and formaldehyde show higher concentrations in the northern steppe regions. There is a direct relationship between the content of formaldehyde and glyoxal against the background of the inverse relationship between these two components and nitrogen dioxide, bromine oxide and ozone. A direct relationship between the content of nitrogen dioxide, bromine oxide and ozone has been revealed. For these three substances, there is an inverse relationship with the water vapor content. There are steady trends in the region, consistent with global trends, towards an increase in the concentration of carbon dioxide and methane and a decrease in the content of water vapor in the atmosphere.

Keywords: satellite data, greenhouse gases, components of the chemical composition of the atmosphere, anthropogenic impurities, spatial and temporal dynamics, landscape and ecological zones, rank of anthropogenic impact, Chechen Republic.

Acknowledgements: The work was supported by the state assignment of the Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov FZNU-2024-0002.

For citation: Myachina K.V., Kerimov I.A. Spatial and temporal analysis of the geoecological state of the Chechen Republic atmosphere based on satellite data. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2026. 16(1): 204-216. DOI: 10.46698/VNC.2026.36.64.001

Введение

В последние десятилетия, в свете климатических изменений и их последствий, проблема геоэкологического состояния атмосферы стала одной из наиболее актуальных и обсуждаемых на уровне научного и общественного дискурса. Среди факторов, способствующих усилению парникового эффекта и глобальному потеплению, особое значение имеют такие переменные компоненты атмосферы, как парниковые газы: диоксид углерода (CO_2), метан (CH_4) и водяной пар [Lewis, Maslin, 2015; Gleckler et al., 2016; Guo et al., 2017]. Химический состав атмосферы, включая комплекс антропогенных примесей, оказывает значительное влияние на климатические процессы и здоровье населения [Заалишвили и др., 2023]. Многостороннее взаимодействие компонентов атмосферы приводит как к усилению, так и к смягчению действия парниковых газов.

Современным инструментом для отслеживания состояния компонентов экосистем как на глобальном, так и на региональном уровне стал космический мониторинг, позволяющий получить актуальную информацию, в том числе и о пространственно-временной динамике атмосферных компонентов [Тронин и др., 2021; Вареник и др., 2021; Медведева и др., 2024]. На их концентрацию, взаимодействие и перенос в значительной степени влияют региональные природно-географические характеристики, включая уровень промышленного развития и урбанизации [Веремчук и др., 2015; Zhao et al., 2022; Sun et al., 2019]. Анализ особенностей совместного присутствия в атмосфере региона парниковых газов и ряда антропогенных примесей, с выявлением аспектов их взаимодействия, призван внести вклад в понимание механизмов формирования и распространения парниковых газов в Чеченской Республике для дальнейшей оценки их влияния на климатические процессы и экологическую ситуацию в регионе.

Задачи исследования:

1 – оценить пространственно-временную динамику концентрации некоторых переменных компонентов атмосферы, включая антропогенные примеси, над территорией Чеченской Республики;

2 – выполнить ранжирование территории региона по уровням антропогенной нагрузки для анализа ее связи с распределением переменных компонентов в атмосфере;

3 – проанализировать пространственно-временные особенности содержания парниковых газов и иных антропогенных примесей (диоксида азота, оксида брома, формальдегида, глиоксаля) в атмосфере региона в связи с такими ее характеристиками, как высота аэрозольного слоя и содержание озона;

4 – проанализировать пространственно-временные тренды компонентов атмосферы Чеченской Республики в привязке к ландшафтно-экологическим зонам региона.

Объекты и методы

Объектом исследования является атмосфера Чеченской Республики. Для получения данных о содержании антропогенных примесей в атмосфере, в том числе – парниковых газов, использовались продукты спутника Sentinel-5P третьего уровня обработки за период с 2018 по 2024 гг. для всех показателей, кроме диоксида углерода. Анализ диоксида углерода выполнен с помощью продуктов спутникаOCO, доступных за период с 2018 по 2022 гг. Анализировались переменные компоненты состава атмосферы (аэрозоли, озон), антропогенные загрязнители (диоксид азота, оксид брома, глиоксаль, формальдегид), в том числе – парниковые газы (водяной пар, диоксид углерода, метан). Вещества в атмосфере находятся в сложном взаимодействии, образуя единую систему, регулирующую баланс тепла и влияющую на парниковый эффект. Водяной пар – главный парниковый газ, по большей части природного происхождения, усиливающий парниковый эффект за счет обратной связи: повышение температуры увеличивает влажность, что усиливает парниковый эффект, снова по-

вышающий температуру. Диоксид углерода и метан – основные антропогенные парниковые газы, усиливающие теплоизоляцию атмосферы. Двойственное, практически противоположное действие оказывает содержащийся в ней озон: в тропосфере действует как парниковый газ, усиливая нагрев, а в стратосфере защищает от ультрафиолетового излучения. Аналогично, аэрозоли могут как охлаждать, так и нагревать атмосферу: отражая солнечный свет, создавать эффект охлаждения, или наоборот, поглощать тепло (черные углеродные частицы). В свою очередь, повышение концентрации парниковых газов может изменять состав и свойства аэрозолей, например, за счет изменения влажности или химического состава атмосферы. Диоксид азота и монооксид брома участвуют в химических реакциях, образующих озон и другие соединения, влияющие на парниковый эффект. Глиоксаль и формальдегид – продукты фотохимических реакций, участвующие в образовании аэрозолей и озона [Soderlund, Svensson, 1976; Soden, Held, 2006; Schulz et al., 2006; Solomon et al., 2011; Ciais et al., 2014].

По каждому из девяти вышеперечисленных показателей собирались и анализировались ежемесячные данные. Анализ особенностей пространственно-временной динамики концентрации компонентов атмосферы Чеченской Республики и анализ их трендов выполнялся с помощью методов графического сопоставления и ГИС-интерполяции пространственных данных. Затем, на основе балльной системы оценок, выполнялось ранжирование территории региона по уровням антропогенной нагрузки. Среднемесячные значения концентрации анализируемых веществ за исследуемый период рассчитывались для атмосферы каждой из выделенных ранее ландшафтно-экологических зон (ЛЭЗ) Чеченской Республики (рис. 1).

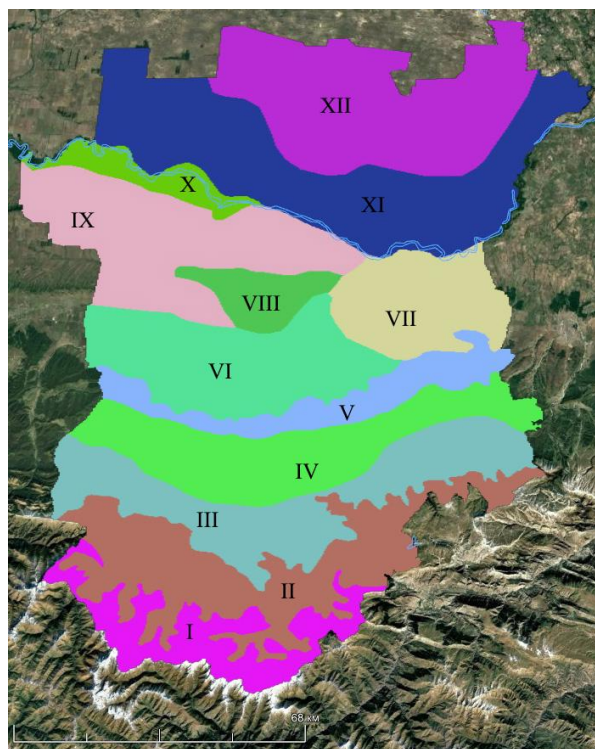


Рис. 1. Ландшафтно-экологическое зонирование территории Чеченской Республики, где
I – Высокогорная нивально-гляциальная ЛЭЗ, II – Высокогорная горно-луговая ЛЭЗ,
III – Высокогорная горнолесная ЛЭЗ, IV – Среднегорно-низкогорная ЛЭЗ широколиственных лесов,
V – Низкогорная лесолуговая ЛЭЗ, VI – Предгорно-равнинная лесостепная и степная ЛЭЗ,
VII – Восточная равнинно-холмистая степная и лесостепная ЛЭЗ, VIII – Центральная равнинно-холмистая степная ЛЭЗ, IX – Терско-Сунженская холмисто-равнинная степная ЛЭЗ,
X – Притеречно-равнинная степная ЛЭЗ, XI – Затеречная равнинная степная ЛЭЗ,
XII – Затеречная равнинная полупустынная ЛЭЗ /

Fig. 1. Landscape and ecological zoning of the territory of the Chechen Republic, where I is a High-altitude nival–glacial landscape and ecological zone (LEZ), II is a High-altitude mountain–meadow LEZ, III is a High-altitude mountain–forest LEZ, IV is a Medium–mountain–low–mountain LEZ of broad-leaved forests, V is a Low-mountain lowland LEZ, VI is a Foothill–plain forest–steppe and steppe LEZ, VII is an Eastern plain–hilly steppe and forest–steppe LEZ, VIII is a Central plain–hilly steppe LEZ, IX – Tersko-Sunzhenskaya hilly–plain steppe LEZ, X is a Twilight–plain steppe LEZ, XI is a Twilight plain steppe LEZ, XII is a Shadowy lowland semi-desert lane LEZ

Результаты и обсуждение

1. Особенности пространственно-временной динамики концентрации некоторых переменных компонентов атмосферы, в том числе ее антропогенных загрязнителей, над территорией Чеченской Республики.

Как видно на рисунке 1, в пределах региона исследования выделено 12 ЛЭЗ. В атмосфере каждой из них рассчитывались концентрации анализируемых компонентов за период с 2018 по 2024 гг. Ожидалось, что их общая динамика будет относительно схожей для большей части ЛЭЗ, а изменение содержания каждого отдельного компонента будет иметь свои особенности.

Выявлено, что общие закономерности изменений концентраций исследуемых веществ являются сезонными и аналогичны для всех 12 ЛЭЗ. Максимальные значения высоты аэрозольного слоя наблюдаются в ноябре-марте, содержания водяного пара – в июне-сентябре, озона – в январе-марте, диоксида азота – в ноябре-марте, оксида брома – в январе-марте, глиоксаля – в мае-июле, формальдегида – в июне-августе, диоксида углерода – в январе-марте, с тенденцией неуклонного ежегодного роста концентрации. Сезонные закономерности содержания метана в атмосфере региона четко не выявляются, но, аналогично диоксиду углерода, наблюдается его неуклонный рост. Пространственно-временная динамика высоты аэрозольного слоя и содержания водяного пара в атмосфере региона представлена на рисунках 2 и 3.

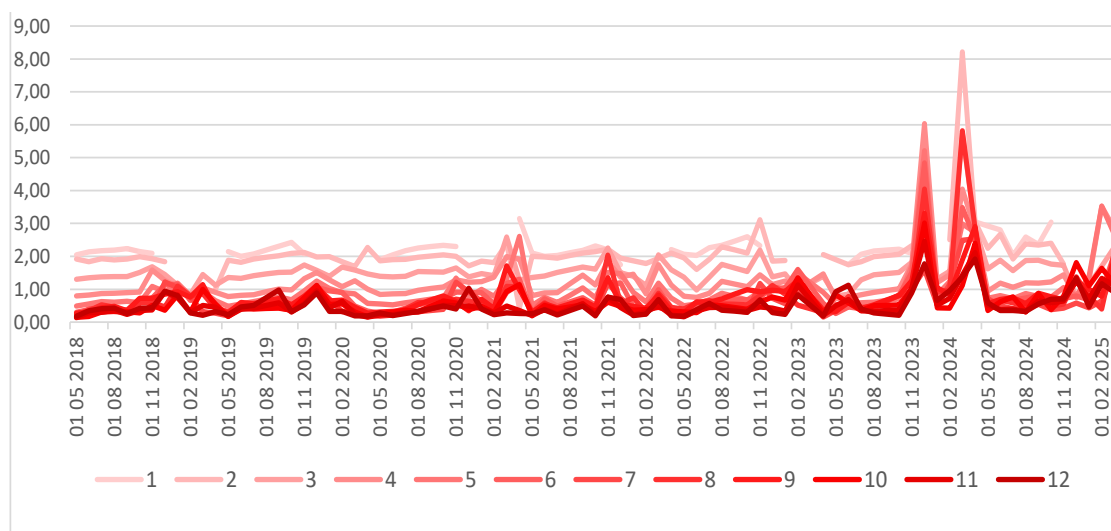


Рис. 2. Динамика высоты аэрозольного слоя в атмосфере Чеченской Республики за 2018–2024 гг., где по оси x отложены даты измерений в указанном периоде, по оси y – высота столба аэрозоля (км); 1–12 – цвет линии графика для каждого из 12 классов ландшафтного покрова /

Fig. 2. Dynamics of the aerosol layer height in the atmosphere of the Chechen Republic for 2018–2024, where the measurement dates in the specified period are plotted on the x-axis, the height of the aerosol column (km) on the y-axis; 1–12 is the color of the graph line for each of the 12 classes of landscape cover

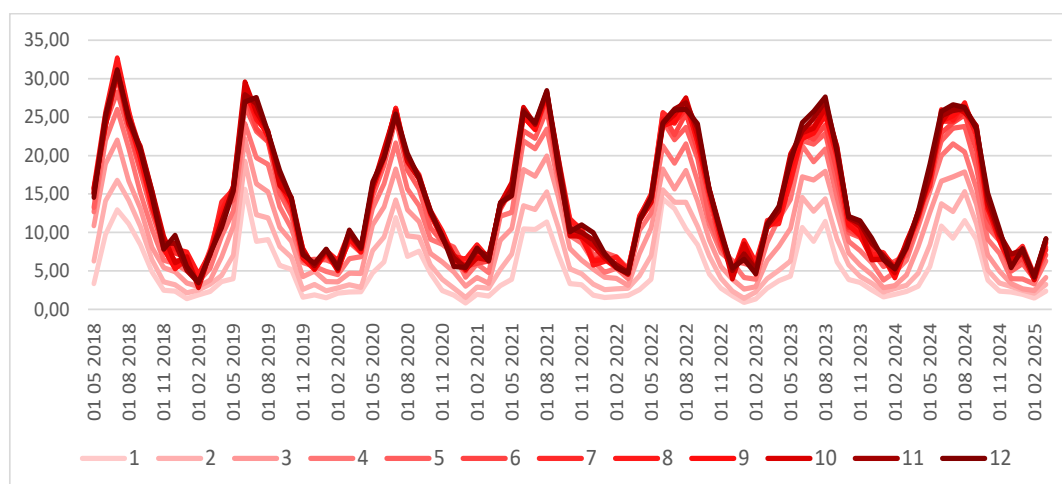


Рис. 3. Динамика содержания водяного пара в атмосфере Чеченской Республики за 2018–2024 гг., где по оси x отложены даты измерений в указанном периоде, по оси y – средняя концентрация водяного пара ($\text{кг}/\text{м}^2$); 1–12 – цвет линии графика для каждого из 12 классов ландшафтного покрова /

Fig. 3. Dynamics of water vapor content in the atmosphere of the Chechen Republic for 2018–2024, where the measurement dates in the specified period are plotted on the x -axis, the average concentration of water vapor (kg/m^2) on the y -axis; 1–12 is the color of the graph line for each of the 12 classes of landscape cover

Параллельно можно проследить разницу в содержании анализируемых веществ в атмосфере каждой ЛЭЗ. Независимо от сезона года, минимальные значения высоты аэрозольного слоя наблюдаются над ЛЭЗ VII–XII, расположенными в центральной и северной равнинно-степных частях региона, максимальные – в горных и предгорных районах. И наоборот, максимальное содержание водяного пара отмечается над равнинными ЛЭЗ центральной и северной частей региона, минимальные – в горных и предгорных районах. Озон в атмосфере Чеченской Республики распределен практически равномерно, лишь с незначительным превышением в северных степных ЛЭЗ. Максимальные концентрации диоксида азота также наблюдаются в северных степных ЛЭЗ VII–XII; в этих же районах выявляются положительные зимние экстремумы значений, в отличие от предгорных и горных территорий, где сезонные колебания значений диоксида азота более сглажены. Содержание оксида брома, аналогично озону, практически не меняется в атмосфере ЛЭЗ. Глиоксаль и формальдегид показывают чуть более высокие концентрации в северных степных ЛЭЗ. Диоксид углерода в атмосфере региона распределен неравномерно: максимальные значения прослеживаются в северной части, в равнинных полупустынных и степных районах; в центральных районах республики концентрации диоксида углерода плавно снижаются и принимают минимальные значения на юге, в низкогорных, среднегорных и высокогорных районах. Наиболее высокие показатели содержания метана наблюдаются в атмосфере предгорных и равнинно-степном северном районах Чеченской Республики, что, возможно, обусловлено наличием значительного поголовья крупного и мелкого рогатого скота.

2. Ранжирование территории региона по уровням антропогенной нагрузки для выявления ее связи с распределением переменных компонентов и загрязняющих примесей в атмосфере региона.

Уровень антропогенной нагрузки рассчитывался для каждой ЛЭЗ путем суммирования баллов, присвоенных в ходе экспертной оценки влияния основных видов хозяйственной деятельности на ландшафты [Кочуров, Карандеев, 2018; Мукаев, Озгелдинова, 2018; Басова, 2010; Мячина, 2013]. Баллы назначались с учетом масштаба влияния различных типов природопользования в пределах ЛЭЗ, выявленного на основе собранной нами ранее статистики площадей классов землепользования в регионе исследования [Мячина и др., 2025]. Суммарные баллы антропогенной нагрузки на ландшафты каждой ЛЭЗ позволили ранжировать территорию региона по уровням антропогенной нагрузки. Полученные ранги представлены на рисунке 4.

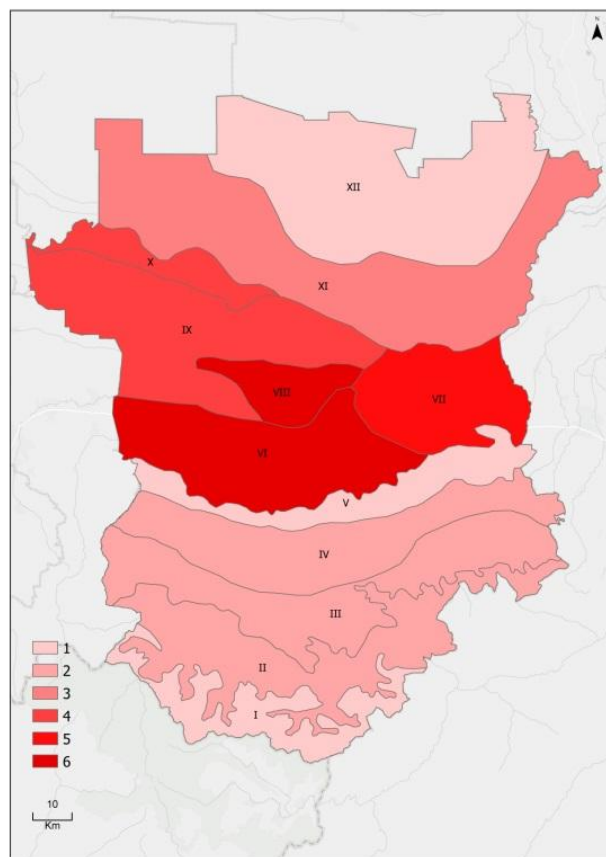


Рис. 4. Ранжирование территории Чеченской Республики по уровням антропогенной нагрузки, где I–XII – ландшафтно-экологические зоны, а цветовая шкала в красных оттенках демонстрирует ранги антропогенной нагрузки на ландшафты, где 1 – минимальная нагрузка, 6 – максимальная нагрузка /

Fig. 4. Ranking of the territory of the Chechen Republic by levels of anthropogenic impact, where I–XII are landscape and ecological zones, and the color scale in red shades shows the ranks of anthropogenic impact on landscapes, where 1 is the minimum impact, 6 is the maximum impact

3. Анализ пространственно-временных особенностей содержания парниковых газов в атмосфере региона в связи с такими ее характеристиками, как высота аэрозольного слоя и содержание озона.

Анализ выполнялся для атмосферы каждой ЛЭЗ с привязкой к ранжированию по уровням антропогенной нагрузки. Построены графики содержания парниковых газов диоксида углерода и метана в атмосфере каждой ЛЭЗ. Полученные данные соотнесены с рангами антропогенной нагрузки и распределением таких характеристик атмосферы, как высота аэрозольного слоя и концентрация озона (рис. 5).

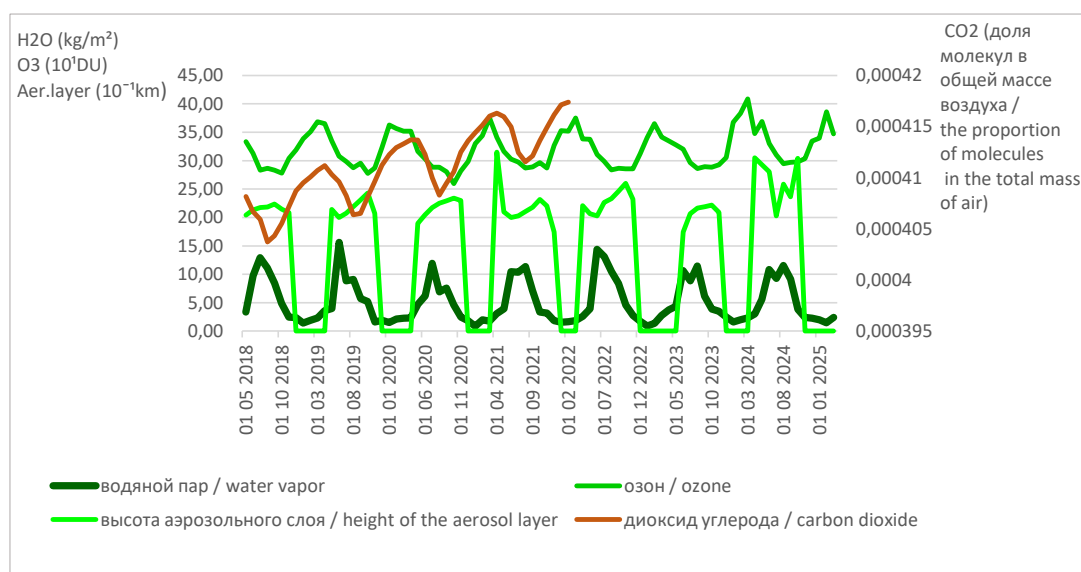


Рис. 5. Динамика содержания диоксида углерода в атмосфере ЛЭЗ VI (6 максимальный ранг антропогенной нагрузки) за период с 2018 по 2022 гг. в связи с динамикой водяного пара, озона и высоты аэрозольного слоя /

Fig. 5. Dynamics of carbon dioxide content in the atmosphere of LEZ VI (6 maximum anthropogenic impact rank) for the period from 2018 to 2022 in connection with the dynamics of water vapor, ozone and the height of the aerosol layer

Нужно отметить следующее ограничение: для первой, второй, третьей и, частично, четвертой ЛЭЗ, расположенных в горной местности, затруднительно безошибочно определить концентрацию метана из-за ограничения угла наклона спутника.

Выявлено, что в атмосфере всех ЛЭЗ, независимо от ранга антропогенной нагрузки, существует прямая корреляция содержания диоксида углерода (CO_2) с содержанием озона (O_3) и с высотой аэрозольного слоя. Между содержаниями диоксида углерода и водяного пара отмечается обратная корреляция. Такая закономерность распределения диоксида углерода в атмосфере региона согласуется с результатами, полученными авторами ранее [Мячина и др., 2024].

Между содержаниями водяного пара и озона, содержанием водяного пара и высотой аэрозольного слоя также выявлена обратная корреляция; между содержанием озона и высотой аэрозольного слоя отмечается прямая корреляция.

В атмосфере VI, VII и VIII ландшафтно-экологических зон, относящихся к 5 и 6 рангам антропогенной нагрузки, выявляется обратная корреляция между содержаниями озона и метана (CH_4), что, возможно, объясняется значимым уровнем концентрации диоксида азота (NO_2) в атмосфере указанных ЛЭЗ. Все вышеперечисленное справедливо для равнинных территорий V–XII ЛЭЗ, в то время как показатели для I, II, III и, частично, IV ЛЭЗ отличаются некоторыми искажениями из-за наклона угла спутника в гористой местности.

Выделены общие закономерности динамики компонентов атмосферы каждой ЛЭЗ. Во всех ЛЭЗ, независимо от ранга антропогенной нагрузки, выявляется прямая связь между содержаниями диоксида азота, оксида брома и озона. У трех указанных веществ наблюдается обратная связь с содержанием водяного пара. Между содержаниями формальдегида и глиоксали также прослеживается прямая связь на фоне обратной связи между этими двумя компонентами и диоксидом азота, оксидом брома и озоном. Соответственно, формальдегид и глиоксаль демонстрируют прямую связь с содержанием водяного пара.

Можно отметить ряд особенностей в распределении антропогенных загрязнителей в атмосфере Чеченской Республики в привязке к ЛЭЗ и ландшафтам с различными рангами антропогенной нагрузки. Так, в атмосфере ЛЭЗ, относящихся к минимальному рангу антропогенной нагрузки (ранг 1) наблюдаются концентрации диоксида азота и оксида брома, сопоставимые с концентрациями этих веществ в зонах с максимальным рангом антропогенной нагрузки (ранг 6). Концентрации формальдегида и глиоксаля также не показывают зависимости от ранга антропогенной нагрузки в пределах ландшафтно-экологических зон. Наиболее высокая концентрация этих веществ выявляется над ЛЭЗ X и VI (4 и 6 ранг антропогенной нагрузки соответственно). Судя по всему, содержание исследуемых антропогенных примесей в первую очередь зависит от природных условий ЛЭЗ. Например, оксид брома показывает максимальные значения в горной местности, несмотря на то, что горные ЛЭЗ относятся к 1 и 2 рангу экологической опасности, в то время как в ЛЭЗ равнинных территорий с высокими уровнями экологической опасности оксид брома демонстрирует более низкие концентрации.

4. Общие пространственно-временные тренды компонентов атмосферы Чеченской Республики в привязке к ландшафтно-экологическим зонам региона.

Для анализа особенностей динамики содержания изучаемых веществ в атмосфере региона построены картосхемы их пространственно-временных трендов за исследуемый период. Обнаружено, что концентрация водяного пара в атмосфере региона снижается над всеми ЛЭЗ, кроме горных. Максимальное снижение содержания водяного пара прослеживается в атмосфере VI и VIII ЛЭЗ, отнесенных к максимальному 6 рангу антропогенной нагрузки (рис. 6).

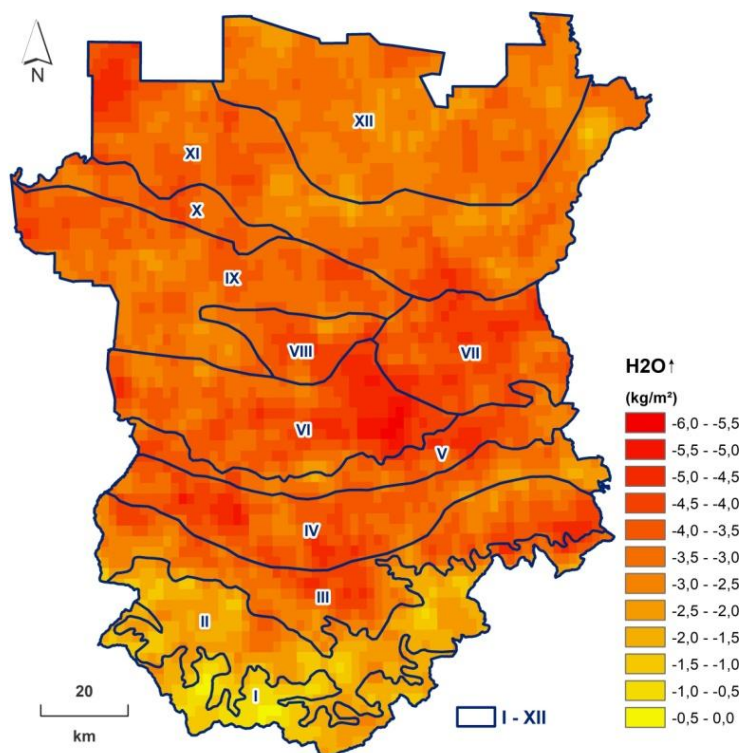


Рис. 6. Пространственно-временные тренды содержания водяного пара в атмосфере Чеченской Республики за период с 2018 по 2024 гг. (цветовая шкала), где I-XII – ландшафтно-экологические зоны /

Fig. 6. Spatial and temporal trends of water vapor content in the atmosphere of the Chechen Republic for the period from 2018 to 2024, (color scale), where I-XII are landscape-ecological zones

Концентрация озона в атмосфере региона демонстрирует тенденцию к росту, особенно заметную в горных и предгорных ЛЭЗ. Содержание диоксида азота в атмосфере Чеченской Республики относительно стабильно (и даже снижается) в северных равнинных и южных горных районах, в то время как в центральной части региона, относящейся к 5 и 6 максимальным рангам антропогенной нагрузки, концентрация диоксида азота ощутимо выросла за исследуемый шестилетний период.

Содержание оксида брома в атмосфере региона демонстрирует почти равномерный устойчивый рост. Содержание глиоксала за исследуемый период показывает стремление к снижению, за исключением западной части горной территории и отдельных мелких ареалов равнинной зоны в центре и на севере региона. Содержание формальдегида устойчиво снижается над всей территорией региона, кроме горных и предгорных районов в его южной части. Парниковый газ диоксид углерода демонстрирует устойчивый рост концентрации в атмосфере региона. В то же время, на равнинных территориях центральной и северной частей региона рост концентрации происходит медленнее, чем в горных экологических районах. Парниковый газ метан также демонстрирует тенденцию к росту, особенно явную над ЛЭЗ, относящимися к 5 и 6 максимальным рангам антропогенной нагрузки, а также в северо-восточной равнинной части области, где, вероятно, расположены многочисленные пастбищные угодья.

Выводы

Общие закономерности динамики содержания в атмосфере таких компонентов, как водяной пар, озон, диоксид углерода, диоксид азота, оксид брома, глиоксаль, формальдегид и метан являются сезонными и практически аналогичны для всех 12 ландшафтно-экологических зон Чеченской Республики. Максимальные содержания основного парникового газа – водяного пара – отмечаются над ландшафтно-экологическими зонами в центральной и северной равнинных частях региона, минимальные – в горных и предгорных районах. Наблюдается общая тенденция к снижению его концентрации над территорией региона, что особенно заметно над ландшафтно-экологическими зонами, приуроченными к территориям с максимальным шестым рангом антропогенной нагрузки.

Максимальные значения концентрации парникового газа диоксида углерода прослеживаются в северной части Чеченской Республики, в равнинных полупустынных и степных районах. Над центральными районами региона концентрация диоксида углерода планомерно снижается, принимая минимальные значения на юге, в низкогорных, среднегорных и высокогорных районах. При этом между содержаниями диоксида углерода и водяного пара отмечается обратная связь. Во всех ландшафтно-экологических зонах, независимо от ранга антропогенной нагрузки, прослеживается прямая связь между содержанием диоксида углерода, содержанием озона и высотой аэрозольного слоя. И наоборот, в парах «содержание водяного пара – содержание озона» и «содержание водяного пара – высота аэрозольного слоя» отмечается обратная связь. При этом минимальные значения высоты аэрозольного слоя наблюдаются над ландшафтно-экологическими зонами VII–XII, расположенными в центральной и северной равнинно-степных частях региона, максимальные – в горных и предгорных районах.

Наиболее высокие показатели парникового газа метана наблюдаются в атмосфере предгорных районов и равнинно-степного северного экологического района.

Озон и оксид брома в атмосфере Чеченской Республики распределены практически равномерно, а максимальные концентрации диоксида азота наблюдаются в северных равнинных районах. Глиоксаль и формальдегид демонстрируют более вы-

сокие концентрации в северных степных районах. Между содержаниями формальдегида и глиоксаля прослеживается прямая связь на фоне обратной связи между этими двумя компонентами и диоксидом азота, оксидом брома и озоном. Соответственно, формальдегид и глиоксаль выказывают прямую связь с содержанием водяного пара.

В атмосфере всех ландшафтно-экологических зон, независимо от ранга антропогенной нагрузки, выявляется прямая зависимость между содержаниями диоксида азота, оксида брома и озона. Для этих трех веществ также прослеживается обратная связь с содержанием водяного пара.

Независимо от динамики концентрации атмосферных загрязнителей и вариантов их взаимовлияния, в регионе отмечаются тенденции, соответствующие общемировым, к повышению концентрации парниковых газов диоксида углерода и метана и к снижению содержания водяного пара.

Можно говорить о значительном влиянии воздушного массопереноса на распределение изучаемых веществ в атмосфере Чеченской Республики. Особенность региона исследования заключается в сочетании равнинной и горной территорий; формирующиеся ламинарные и турбулентные воздушные потоки взаимодействуют с образованием вихрей, способствующих активному перемешиванию воздушных масс, вертикальному и горизонтальному переносу загрязнений.

Литература

1. Басова Т.А. Оценка антропогенной нарушенности ландшафтов Акмолинской области. // География и водные ресурсы. – 2010. – № 4. – С. 28–33.
2. Вареник А.В., Калинин Д.В., Мыслина М.А. Исследование взвешенных микрочастиц в атмосфере береговой зоны Черного моря по натурным и спутниковым данным. Морской гидрофизический журнал. – 2021. – Т. 37. № 3(219). – С. 350–361.
3. Веремчук Л.В., Янькова В.И., Виткина Т.И., Голохваст К.С., Барскова Л.С. Загрязнение атмосферы урбанизированной территории как системный процесс взаимодействия факторов окружающей среды. // Здоровье. Медицинская экология. Наука. – 2015. – Т. 61. № 3. – С. 35–42.
4. Заалишвили В.Б., Кануков А.С., Корбесова К.В., Майсурадзе М.В. Определение уровня загрязнения атмосферного воздуха урбанизированной территории автомобильным транспортом. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 133–148. DOI: 10.46698/VNC.2023.76.91.011.
5. Кочуров Б.И., Карандеев А.Ю. Геоэкологическое картографирование и оценка городского пространства с применением сеточного векторного ГИС-анализа. // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2018. – Т. 24. № 1. – С. 310–320.
6. Медведева И.В., Татарников А.В., Едемский И.К., Саункин А.В. Сезонные вариации атмосферных примесей в Байкальском регионе по данным спутниковых наблюдений Aura MLS. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21. № 2. – С. 315–324.
7. Мукаев Ж.Т., Озгелдинова Ж.О. Оценка антропогенного воздействия на ландшафты бассейна озера Алаколь. // Гидрометеорология и экология. – 2018. – № 4(91). – С. 94–102.
8. Мячина К.В., Керимов И.А., Ряхов Р.В., Дубровская С.А. Изучение поглотительной способности ландшафтов в отношении диоксида углерода с помощью ДДЗ (на примере степных, лесостепных и горнолесных регионов юга России). // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 1. – С. 141–151. DOI: 10.46698/VNC.2024.41.38.010.
9. Мячина К.В., Керимов И.А., Ряхов Р.В., Щавелев А.Н. Особенности регионального распределения парниковых газов в зависимости от ландшафтно-географических факторов (на примере Чеченской Республики). // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2025. – Т. 69. № 4. – С. 45–58. DOI: 10.30533/GiA-2025-046.
10. Мячина К.В. Анализ космических изображений с расчетом NDVI для изучения динамики ландшафтного покрова территории нефтяного месторождения в Оренбургской области. // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2013. – № 4(42). – С. 206–209.

11. Тронин А.А., Киселев А.В., Васильев М.П., Седеева М.С., Неробелов Г.М. Мониторинг содержания диоксида азота в воздушном бассейне России по спутниковым данным в условиях пандемии COVID-19. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. № 3. – С. 309–313.
12. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., House J.I. Carbon and other biogeochemical cycles. // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. – Cambridge University Press, 2014. – С. 465–570.
13. Gleckler P.J., Durack P.J., Stouffer R.J., Johnson G.C., Forest C.E. Industrial-era global ocean heat uptake doubles in recent decades. // *Nature Climate Change*. – 2016. – Vol. 6. No. 4. – pp. 394–398. DOI: 10.1038/nclimate2915.
14. Guo D., Wang J., Fu H., Wen H., Luo Y. Cropland has higher soil carbon residence time than grassland in the subsurface layer on the Loess Plateau, China. // *Soil and Tillage Research*. – 2017. – Vol. 174. – pp. 130–138. DOI: 10.1016/j.still.2017.07.003.
15. Lewis S.L., Maslin M.A. Defining the Anthropocene. // *Nature*. – 2015. – Vol. 519(7542). – pp. 171–80. DOI: 10.1038/nature14258.
16. Schulz M., Textor C., Kinne S., Balkanski Y., Bauer S., Bernsten T. et al. Radiative forcing by aerosols as derived from the AeroCom present-day and pre-industrial simulations. // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2006. – Vol. 6. No. 12. – pp. 5225–5246.
17. Soden B.J., Held I.M. An assessment of climate feedbacks in coupled ocean–atmosphere models. // *Journal of Climate*. – 2006. – Vol. 19. No. 14. – pp. 3354–3360.
18. Soderlund R., Svensson B.H. The global nitrogen cycle. // *Ecological Bulletins*. – 1976. – pp. 23–73.
19. Solomon S., Daniel J.S., Neely III R.R., Vernier J.P., Dutton E.G., Thomason L.W. The persistently variable “background” stratospheric aerosol layer and global climate change. // *Science*. – 2011. – Vol. 333. No. 6044. – pp. 866–870.
20. Sun Z., Zhan D., Jin F. Spatio-temporal characteristics and geographical determinants of air quality in cities at the prefecture level and above in China. // *Chinese Geographical Science*. – 2019. – Vol. 29. No. 2. – pp. 316–324.
21. Zhao Y., Zhang X., Chen M., Gao S., Li R. Regional variation of urban air quality in China and its dominant factors. // *Journal of Geographical Sciences*. – 2022. – Vol. 32. No. 5. – С. 853–872.

References

1. Basova T.A. Assessment of anthropogenic disturbance of landscapes of the Akmola region. *Geography and Water Resources*. 2010. No. 4. pp. 28–33. (In Russ.)
2. Varenik A.V., Kalinskaya D.V., Myslina M.A. Investigation of suspended microparticles in the atmosphere of the coastal zone of the Black Sea based on natural and satellite data. *Marine Hydrophysical Journal*. 2021. Vol. 37. No. 3(219). pp. 350–361. (In Russ.)
3. Veremchuk L.V., Yankova V.I., Vitkina T.I., Golokhvast K.S., Barskova L.S. The atmospheric pollution in urbanized territories as a system process of the interaction of environmental factors. *Health. Medical Ecology. Science*. 2015. Vol. 61. No. 3. pp. 35–42. (In Russ.)
4. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Korbesova K.V., Maisuradze M.V. Determination of air pollution levels caused by the road transport in urbanized areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 133–148. DOI: 10.46698/VNC.2023.76.91.011. (In Russ.)
5. Kochurov B.I., Karandeev A.Yu. Urban space geoecological mapping and assessment with vector fishnet GIS analysis. *The InterCarto. InterGIS*. 2018. Vol. 24. No. 1. pp. 310–320. (In Russ.)
6. Medvedeva I.V., Tatarnikov A.V., Edemskiy I.K., Saunkin A.V. Seasonal variations in the atmospheric constituents in the Baikal region from Aura MLS satellite observations. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2024. Vol. 21. No. 2. p. 315–324. (In Russ.)
7. Mukaev Zh.T., O zgeldinova Zh.O. Assessment of anthropogenic impact on the landscapes of Lake Alakol basin. *Hydrometeorology and Ecology*. 2018. No. 4(91). pp. 94–102. (In Russ.)
8. Myachina K.V., Kerimov I.A., Rakhov R.V., Dubrovskaya S.A. Study of the landscape absorption capacity regarding to carbon dioxide using remote sensing data (steppe, forest-steppe and mountain-forest regions of Southern Russia as examples. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 1. pp. 141–151. DOI: 10.46698/VNC.2024.41.38.010 (In Russ.)

9. Myachina K.V., Kerimov I.A., Ryakhov R.V., Shchavelev A.N. Greenhouse gases regional distribution depending on landscape and geographical features based on space survey materials (Chechen Republic as the example). *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025. Vol. 69. No. 4. pp. 45–58. DOI: 10.30533/GiA-2025-046. (In Russ.)
10. Myachina K.V. Analysis of satellite images with NDVI calculation for studying the dynamics of the landscape cover of the territory of an oil field in the Orenburg region. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2013. No. 4(42). pp. 206–209. (In Russ.)
11. Tronin A.A., Kiselyov A.V., Vasiliev M.P., Sedeeva M.S., Nerobelov G.M. Monitoring NO₂ content in the atmosphere of Russia using satellite data during COVID-19 pandemic. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2021. Vol. 18. No. 3. pp. 309–313. (In Russ.)
12. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., House J.I. Carbon and other biogeochemical cycles. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. 2014. pp. 465–570.
13. Gleckler P.J., Durack P.J., Stouffer R.J., Johnson G.C., Forest C.E. Industrial-era global ocean heat uptake doubles in recent decades. *Nature Climate Change*. 2016. Vol. 6. No. 4. pp. 394–398. DOI: 10.1038/nclimate2915.
14. Guo D., Wang J., Fu H., Wen H., Luo Y. Cropland has higher soil carbon residence time than grassland in the subsurface layer on the Loess Plateau, China. *Soil and Tillage Research*. 2017. Vol. 174. pp. 130–138. DOI: 10.1016/j.still.2017.07.003.
15. Lewis S.L., Maslin M.A. Defining the Anthropocene. *Nature*. 2015. Vol. 519(7542). pp. 171–80. DOI: 10.1038/nature14258.
16. Schulz M., Textor C., Kinne S., Balkanski Y., Bauer S., Bernsten T. et al. Radiative forcing by aerosols as derived from the AeroCom present-day and pre-industrial simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2006. Vol. 6. No. 12. pp. 5225–5246.
17. Soden B.J., Held I.M. An assessment of climate feedbacks in coupled ocean–atmosphere models. *Journal of Climate*. 2006. Vol. 19. No. 14. pp. 3354–3360.
18. Soderlund R., Svensson B.H. The global nitrogen cycle. *Ecological Bulletins*. 1976. pp. 23–73.
19. Solomon S., Daniel J.S., Neely III R.R., Vernier J.P., Dutton E.G., Thomason L.W. The persistently variable “background” stratospheric aerosol layer and global climate change. *Science*. 2011. Vol. 333. No. 6044. pp. 866–870.
20. Sun Z., Zhan D., Jin F. Spatio-temporal characteristics and geographical determinants of air quality in cities at the prefecture level and above in China. *Chinese Geographical Science*. 2019. Vol. 29. No. 2. pp. 316–324.
21. Zhao Y., Zhang X., Chen M., Gao S., Li R. Regional variation of urban air quality in China and its dominant factors. *Journal of Geographical Sciences*. 2022. Vol. 32 No. 5. pp. 853–872.

УДК 551.2.01-551.3.053

DOI: 10.46698/VNC.2026.28.31.001

Оригинальная статья

Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние горных территорий (Кармадонское ущелье)

М.О. Ревазов[✉], Д.А. Мельков[✉], О.Г. Бурдзиева[✉], И.Г. Архиреева[✉]

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

Статья поступила: 03.02.2026, доработана: 24.03.2026, принята к публикации: 26.03.2026

Резюме: На территории Северного Кавказа значительно развиты опасные экзогенные процессы различной природы, в том числе, оползневые процессы. С ними связано большое число различных опасных чрезвычайных ситуаций. Активное развитие внутреннего туризма в России в последние годы способствует активной застройке, ранее не используемых высокогорных территорий Северного Кавказа, одновременно повышая и геоэкологическую нагрузку, что определяет **актуальность** ее оценок. **Цель работы** – выявление и количественная оценка факторов, определяющих нагрузку на природные системы в зонах интенсивного и продолжительного антропогенного воздействия. **Методы.** Методологическая база исследования основана на экспертных оценках влияния литологических, геоморфологических, эндогенных, экзогенных и природно-климатических факторов, что позволяет ввести количественные параметры для анализа геодинамических процессов. **Результаты.** Установлено, что эндогенная активность является значительным фактором активизации экзогенных процессов, которые характеризуются устойчивой приуроченностью к тектоническим нарушениям и узлам разноранговых разрывных структур, очаговым зонам сейсмической и вулканоплутонической активности. Оценка уровня геоэкологической нагрузки предполагает необходимость выявления факторов, формирующих их. Появляется возможность прогноза уровня воздействия природно-техногенной нагрузки и разработки мероприятий по смягчению тяжести последствий развития опасных природных процессов и проявления опасных экзогенных процессов: оползней, селей, обвалов при практическом строительстве.

Ключевые слова: геодинамические воздействия и их факторы, эндогенные и экзогенные процессы, экспертные оценки, геоэкологические нагрузки и риски.

Для цитирования: Ревазов М.О., Мельков Д.А., Бурдзиева О.Г., Архиреева И.Г. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние горных территорий (Кармадонское ущелье). *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 217-227. DOI: 10.46698/VNC.2026.28.31.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.28.31.001

Original paper

Influence of geodynamic processes on the geoecological state of mountain areas (Karmadon gorge)

M.O. Revazov^{ORCID}, D.A. Melkov^{ORCID}, O.G. Burdzieva^{ORCID}, I.G. Arkhireeva^{ORCID}

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

Received: 03.02.2026, revised: 24.03.2026, accepted: 26.03.2026

Abstract: Hazardous exogenic processes of various natures, including landslides, are widespread in the North Caucasus. These processes are associated with a large number of hazardous emergency situations. The rapid development of domestic tourism in Russia in recent years has fueled the development of previously unused high-mountain areas of the North Caucasus, simultaneously increasing geoecological load, making assessments relevant. **The aim** of this study is to identify and quantify the factors determining the loadings on natural systems in areas of intense and long-term anthropogenic impact. **Methods.** The study's methodological framework is based on expert assessments of the influence of lithological, geomorphological, endogenous, exogenous, and natural-climatic factors, enabling the introduction of quantitative parameters for the analysis of geodynamic processes. **Results.** It has been established that endogenous activity is a significant factor in the activation of exogenous processes, which are characterized by a stable association with tectonic faults and nodes of various fault structures, as well as focal zones of seismic and volcanoplutonic activity. Assessing the level of geoecological loadings requires identifying the governing factors. This makes it possible to predict the impact of natural and technogenic loadings and develop measures to mitigate the severity of the consequences of hazardous natural processes and the occurrence of hazardous exogenous processes, such as landslides, mudflows, and rockfalls during construction.

Keywords: geodynamic impacts and their factors, endogenous and exogenous processes, expert assessments, geoecological loadings and risks.

For citation: Revazov M.O., Melkov D.A., Burdzieva O.G., Arkhireeva I.G. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of mountain areas (Karmadon gorge). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 217-227. DOI: 10.46698/VNC.2026.28.31.001

Введение

Северный Кавказ представляет собой уникальный полигон для изучения опасных геологических процессов, где их возникновение и интенсивность определяются сложной взаимосвязью эндогенных и экзогенных факторов [Гончаренко и др., 2008; Стасенко и др., 2023; Габараев и др., 2023; Яицкая и др., 2023]. Формирование современной геодинамической обстановки в регионе обусловлено, прежде всего, активной тектоникой, связанной с продолжающейся коллизией Евразийской и Аравийской литосферных плит. Это проявляется в высокой сейсмичности (до 8–9 баллов), развитой сети активных разломов и продолжающемся горообразовании, создающем значительные градиенты рельефа и напряжённое состояние горных пород. Непосредственно на тектонический каркас накладываются литолого-структурные предпосылки. Широкое распространение дислоцированных, трещиноватых осадочных пород (глинистые сланцы, аргиллиты, меловые флишевые толщи) в сочетании с крутыми склонами создаёт иде-

альные условия для развития склоновых процессов. Климатический фактор, характеризующийся резкой континентальностью в высокогорьях и повышенным количеством осадков на наветренных склонах, выступает основным экзогенным триггером. Интенсивное выветривание, ливневые дожди и сезонное снеготаяние постоянно поставляют обломочный материал, повышают поровое давление и снижают прочность грунтов.

В последние десятилетия решающую роль в активизации и развитии геологических рисков стал играть антропогенный фактор. Неконтролируемое освоение склонов под застройку, создание искусственных подпрудных водоёмов, подрезка оснований склонов при дорожном строительстве, перегрузка отвалов и неэффективный дренаж коренным образом изменяют естественный баланс напряжений и фильтрации. В результате на территории Северного Кавказа природная предрасположенность к развитию оползней, обвалов и селей многократно усиливается хозяйственной деятельностью, что формирует комплексную задачу оценки многофакторных рисков.

В настоящее время оползневая опасность на территории Республики Северная Осетия–Алания сохраняется на высоком уровне, оставаясь одним из наиболее дестабилизирующих факторов для устойчивого развития горных территорий. Основные очаги активности сосредоточены в зонах со сложным сочетанием геологических, тектонических и климатических условий: это, прежде всего крутые склоны Скалистого и Пастбищного хребтов, борта ущелий рек Терек, Ардон, Фиагдон, Гизельдон, а также плотно застроенные территории в окрестностях Владикавказа и других населённых пунктов.

Для комплексного анализа взаимодействия указанных факторов и оценки эффективности методов прогноза выбрано Кармадонское ущелье, представляющее собой концентрированное проявление практически всех ключевых опасных геологических процессов, характерных для Северного Кавказа, а его трагическая история, связанная с катастрофическим сходом ледника Колка в 2002 году, делает его уникальным природным лабораторным полигоном.

В геологическом строении изучаемого района принимают участие осадочные, вулканогенные, магматогенные и метаморфогенные образования, охватывающие возрастную интервал от верхнего протерозоя до кайнозоя включительно. Район характеризуется интенсивным развитием складчатых и разрывных структур, обусловленных его положением в центральной части складчатого сооружения Большого Кавказа.

Древний фундамент (протерозой и палеозой) сложен метаморфическими образованиями, представленными кассарской толщей (PR₂ks) – амфиболитами и различными сланцами (кварц-сланцевыми, андалузитовыми, гранатовыми), – а также согласно залегающей на ней мидаграбындонской свитой (C₃–P₁md) верхнего карбона-перми. Последняя сложена кварцевыми песчаниками, алевролитами, филлитовидными сланцами и конгломератами, примечательными наличием медистых песчаников.

Основную роль в строении ущелья играют мощные толщи мезозоя. К триас-раннеюрскому возрасту (со спорным присутствием триаса) относится циклаурская свита (T?–J₁ck). Её отличительная черта – обилие вулканогенных пород основного состава (андезито-базальты, габброиды), образующих потоки, силлы и дайки среди глинистых сланцев, алевролитов и песчаников. Мощность свиты достигает 3000 м.

Нижнеюрский период представлен серией терригенных толщ (кистинская, белореченская, мизурская, галиатская, ксуртская свиты), сложенных преимущественно глинистыми сланцами, алевролитами и песчаниками. Для галиатской свиты (J₁gl) характерен горизонт сидеритовых конкреций. Отложения средней юры представлены глинистыми сланцами, аргиллитами и песчаниками (свиты бейно, отзыкская, гудушаурская). Завершают разрез юры карбонатные породы иронской свиты (J₂–z_{ir}) – известняки и доломиты, слагающие эскарп Скалистого хребта.

Кайнозойские интрузии представлены дайками теплинского комплекса (N₂t) неогенового возраста (гранодиориты, кварцевые диориты), приуроченными к Казбекскому узлу.

Четвертичные отложения покрывают значительную часть ущелья. Это ледниковые (морены), аллювиальные, делювиальные и коллювиальные (оползневые) образования, а также мощные лавовые потоки андезитов, дацитов и их туфов, связанные с деятельностью Казбекского вулканического центра (Qk). Отдельно отмечены последствия катастрофического схода ледника Колка в 2002 г., сформировавшего современный облик долины.

В тектоническом отношении район относится к антиклинорию Большого Кавказа. Основными структурами являются Геналдонская антиклиналь и Кауридонская синклиналь. Территория разбита густой сетью разломов преимущественно субширотного простирания (Терско-Фиангдонский, Даллагкау-Тменикауский взбросы и др.), которые создают блоково-сладчатую, местами чешуйчатую структуру. Эти разломы часто являются зонами дробления и смятия пород, в то время как пути циркуляции минеральных вод (Нижне-Кармадонское и Верхне-Кармадонское месторождения) связывают с трещинами субмеридионального направления.

Гидрогеологические условия. Согласно официальной «Карты прогнозных ресурсов подземных вод, их добычи и извлечения по гидрогеологическим структурам ЮФО» масштаба 1:500 000, в структурно-гидрогеологическом отношении рассматриваемый район приурочен к восточному краю Центрально-Кавказской гидрогеологической складчатой области. Данная гидрогеологическая структура характеризуется наличием горно-сладчатых сооружений, представляющих собой бассейны трещинных, трещинно-пластовых, трещинно-карстовых и трещинно-жильных вод зон тектонических нарушений и контактов. К межгорным и предгорным зонам приурочены артезианские бассейны и системы конусов выноса.

Метод зонирования высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам

Район Кармадонского ущелья представляет собой сложную геодинамическую систему, где взаимодействие тектонических, литологических и экзогенных факторов определяет исключительно высокий мезозойский складчатый фундамент, интенсивно раздробленный системой субширотных разломов (Геналдонская антиклиналь, Центральный грабен), перекрытый чехлом юрских терригенных и карбонатных толщ и увенчанный четвертичными вулканитами Казбекского центра. Ключевым фактором нестабильности является наличие регионального горизонта пластичных, легко обводняемых ниже-среднеюрских глинистых сланцев (свиты мизурская, галиатская), которые выступают в роли главной плоскости скольжения для многочисленных оползней. Активная разгрузка термальных минеральных вод по трещинам в зонах разломов дополнительно снижает прочность пород. Антропогенная нагрузка и катастрофические гляциальные события (сход ледника Колка, 2002 г.) выступают в качестве триггеров, выводящих систему из квазиравновесного состояния. Настоящее исследование демонстрирует эффективность комплексного анализа геолого-тектонических, геофизических и геоморфологических данных для построения концептуальной 3D-модели территории, которая служит основой для оценки опасностей, прогноза их развития и планирования защитных мер.

Метод зонирования высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам – это комплексный географический и геоэкологический подход, направленный на выделение зон с разной степенью устойчивости природной среды к антропогенным воздействиям и естественным геологическим процессам [Dilley et al., 2005; Cutter, 2008, 2014; Corominas et al., 2014; Jaedicke et al., 2014; Vranken et al., 2015]. Для оценки воздействия геодинамических и климатических факторов на окружающую среду использована пятибалльная шкала. В качестве показателя ранга рассматривается роль каждого фактора в развитии опасных геологических процессов, обуславливающая

изменение геоэкологической обстановки [Чотчаев и др., 2020; Заалишвили, Чотчаев, 2022; Бурдзиева и др., 2024 а].

В основу методологии положены экспертные оценки, определяющие максимальный ранг воздействия отдельных факторов [Гольцман, 1976, 1980]. Если на среду воздействуют N факторов, меняя геоэкологическое состояние участка, то уровень ранга 1 интенсивности будет соответствовать минимальному влиянию фактора, а уровень ранга 5 – максимальному [Заалишвили, 2000].

На исследуемой территории, были оценены соответствующие ранги и выполнено зонирование по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями (рис. 1) [Чотчаев и др., 2021].

Факторы воздействия геодинамических и климатических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий Factors influencing geodynamic and climatic processes on the geoeological state of high-mountain territories	Землетрясения в ближней зоне ($R=50\text{km}$), сейсмическая интенсивность, ранг Near-field earthquakes ($R=50\text{km}$), seismic intensity, rank		5
	Зона активного нарушения (плотность нарушений), km/km^2 , ранг Active disturbance zone (disturbance density), km/km^2 , rank	3	
	Зона пересечения субширотных и субмеридиональных нарушений от одного до четырех и выше (пересечение), N , ранг Zone of intersection of sublatitudinal and submeridional disturbances from one to four and higher (intersection), N , rank		4
	Зона развития трещинной тектоники, km/km^2 , ранг Zone of development of fracture tectonics, km/km^2 , rank		5
	Зоны, подверженные воздействию статических геофизических, геохимических полей в радиусе действия событий R , km , ранг Zones affected by static geophysical and geochemical fields within the radius of events R , km , rank	2	
	Зоны проявления событий сейсмодислокаций в пределах структурного блока, N , ранг Zones of seismic dislocation events within a structural block, N , rank		3
	Распространение четвертичных отложений в интервалах высот, H , m , ранг Distribution of Quaternary deposits in height intervals, H , m , rank		4
	Коренные породы мягкие (до 50 МПа), обнаженность, проценты, ранг Bedrocks are soft (up to 50 MPa), exposure, percentage, rank	3	
	Базис эрозии 1000 м и более, на высотах от 2000 и выше, с учетом оледенения, h , m , ранг Erosion base 1000 m and more, at altitudes of 2000 and higher, taking into account glaciation, h , m , rank		4
	Базис эрозии 500 м на высотах от 1500 и выше, h , m , ранг Erosion base 500 m at altitudes of 1500 and above, h , m , rank	2	
	Рельеф с углами наклона до 15° по генетическим типам грунтов, процессы, ранг Relief with slope angles up to 15° by genetic soil types, processes, rank		3
	Рельеф с углами наклона $15-20^\circ$ по генетическим типам грунтов, процессы, ранг Relief with slope angles of $15-20^\circ$ by genetic soil types, processes, rank	2	
	Рельеф с углами наклона $>20^\circ$ по генетическим типам грунтов, процессы, ранг Relief with slope angles $>20^\circ$ by genetic soil types, processes, rank		3
	Мощность четвертичных отложений 0-5 м, при разных углах наклона рельефа, град, ранг The thickness of the Quaternary deposits is 0-5 m, at different angles of relief inclination, deg, rank	2	
	Мощность четвертичных отложений 5-12 м, при различных углах наклона рельефа, град, ранг The thickness of the Quaternary deposits is 5-12 m, at different angles of relief inclination, deg, rank		3
	Мощность четвертичных отложений более 12 м, при различных углах наклона рельефа, град, ранг The thickness of the Quaternary deposits is more than 12 m, with different angles of relief inclination, deg, rank	3	
	Сели за год, объемом от 10 тыс. м^3 и более, N , ранг Settlements per year, volume from 10 thousand m^3 and more, N , rank		5
	Оползни за год, объем, V , м^3 , ранг Landslides per year, volume, V , m^3 , rank	3	
	Обвалы – осыпи, объем, V , тыс. м^3 , ранг Landslides – talus, volume, V , thousand m^3 , rank		4
	Плоскостной сыв, на один km^2 , S , km^2 , ранг Sheet washout, per km^2 , S , km^2 , rank	3	
	Эрозионная деятельность рек «боковая эрозия», I , $\text{м}/\text{час}$, ранг Erosive activity of rivers "lateral erosion", I , m/hour , rank		4
	Струйная эрозия на склонах с углами рельефа, град, ранг Jet erosion on slopes with relief angles, deg, rank	3	
	Карстобразование, проявления на km^2 площади, N , ранг Karst formation, manifestations per km^2 area, N , rank	3	
	Лавины, за год, N , ранг Avalanches, per year, N , rank		5
	Ледники и глетчеры, события паводкового типа, за год, N , ранг Glaciers and glaciers, flood type events, per year, N , rank		4

Весовой рейтинг воздействия, W_{maxi}
Impact Weight Rating, W_{maxi}

Рис. 1. Факторы воздействия геодинамических и климатических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий и их ранжирование /

Fig. 1. Factors influencing geodynamic and climatic processes on the geoeological state of high-mountain territories and their ranking

Каждый из факторов характеризуется определенным потенциалом W_i воздействия на площадку. Далее рассчитывались риски R_i проявления воздействия отдельного фактора с потенциалом W_i и с учетом геоэкологической уязвимости D_i (рис. 2) [Заалишвили, Чотчаев, 2022].

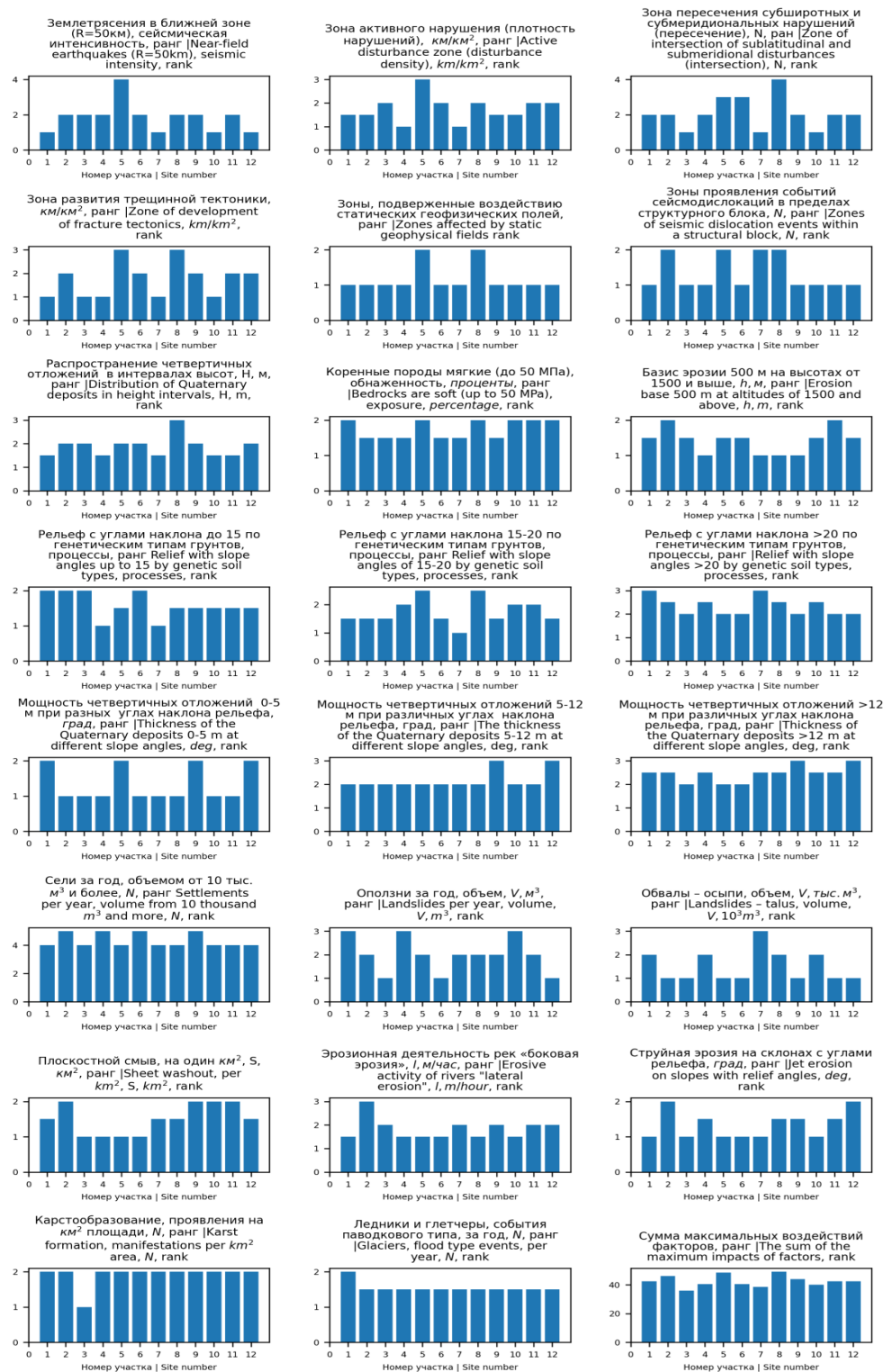


Рис. 2. Оценка факторов воздействия геодинамических и климатических процессов на отдельные зоны исследуемой территории /

Fig. 2. Assessment of the factors of influence of geodynamic and climatic processes on different parts of the study area

Результаты и обсуждение

Зонирование геоэкологической нагрузки (рис. 3) выполнено на основе весового вклада каждого из факторов, которые составили 4 центроидные группы нагрузки: слабую – 30–40 %; среднюю – 40–55 %; высокую – 55–70 % и регрессивную – выше 70 %. Расчеты выполнялись для таксонов 2×2 км на основе ГИС-технологий [Заалишвили, Чотчаев, 2022].

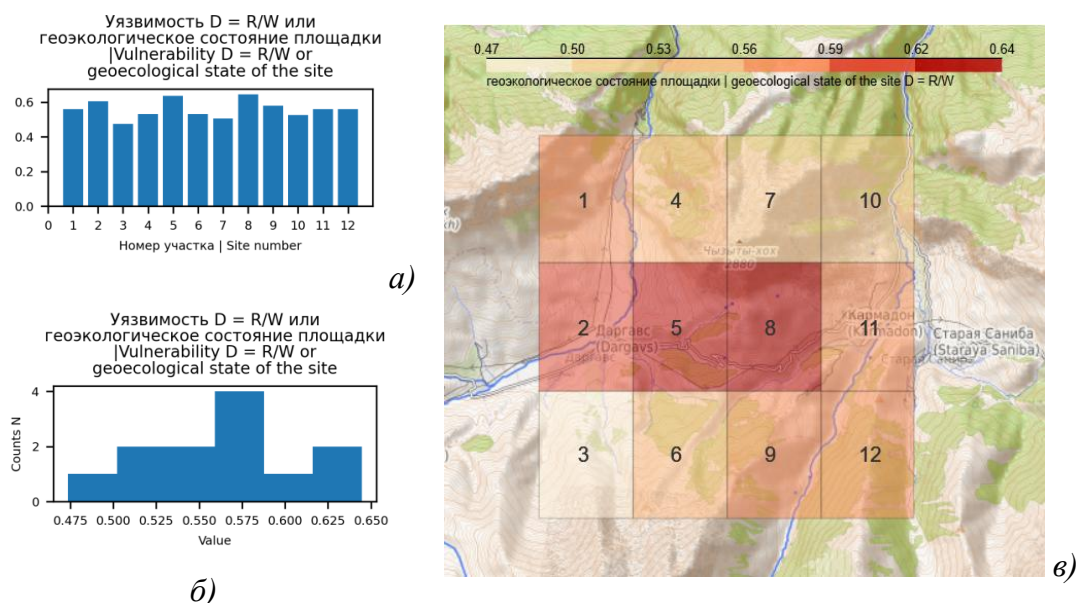


Рис. 3. Результаты ранжирования территории по комплексу факторов воздействия геодинамических и климатических процессов: оценка геоэкологического состояния отдельных зон (а), соответствующие гистограмма распределения (б) и схема (цифрами обозначены номера зон) (в)/

Fig. 3. Results of ranking the territory according to the complex of factors influencing geodynamic and climatic processes: assessment of the geoecological state of individual zones (a), corresponding distribution histogram (b) and scheme (the numbers indicate the zone numbers) (c)

Среднее значение геоэкологического состояния D исследуемой территории составило 0,56 (рис. 3б), зоны, которые можно отнести к данной категории составляют треть территории (3в). Экстремально высокие значения наблюдаются для зон 5 и 8 и имеют одинаковые значения $D = 0,64$. Выше среднего наблюдается значение для зоны 2, $D = 0,61$. К наиболее благоприятной следует отнести зону 3, $D = 0,47$, далее низкий уровень соответствует зоне 7, $D = 0,51$, и для трех зон 4, 6 и 9 – $D = 0,53$. Таким образом, ранжирование рисков воздействий на геоэкологическое состояние среды реализуется по уровням их проявления [Бондаренко и др., 2020; Стогний и др., 2019].

Геоэкологические нагрузки, согласно введенной ранее классификации [Чотчаев и др., 2020] на основе использования экспертных оценок, условно подразделяются на слабые, средние, высокие и регрессивные. Термин «регрессивный» был введен ранее в качестве показателя неустойчивости и опасного состояния толщи с высокой геоэкологической опасностью и риском [Чотчаев и др., 2020; Заалишвили, Чотчаев, 2022].

Видно, что при этом наибольшее проявление опасных процессов приходится на зону автодороги Даргавс-Кармадон, чем определяются высокие риски. Наибольший риск следует ожидать в зоне 2 – освоенной территории Даргавского сельского поселения.

Факторами, определяющими высокий уровень геоэкологического состояния, а именно зоны 5 и 8, являются развитие трещинной тектоники (при весовом рейтинге 5), проявление сейсмодислокаций (весовой рейтинг 3), средние углы наклона рельефа 15–20 градусов (весовой рейтинг 2). Кроме того зона 8 характеризуется наличием пересечений субширотных и субмеридиональных нарушений (весовой рейтинг 4) и распространением четвертичных отложений (весовой рейтинг 4). В свою очередь зона 5 является зоной активных нарушений (весовой рейтинг 3) и сейсмической активности (весовой рейтинг 5), большой мощности четвертичных отложений (весовой рейтинг 3). Таким образом, несмотря на одинаковый уровень суммарной оценки геоэкологического состояния, для данных зон есть как общие, так и различные факторы, определяющие высокий уровень геоэкологической нагрузки. Для зоны 2 можно выделить повышенное развитие эрозионных процессов, струйную эрозию на склонах (ранг 3).

Для безопасного использования инфраструктуры необходимо оценивать уровень воздействия геодинамической активности геотектонических и геоморфологических структур на этих территориях с помощью новейших программ для создания 3D-моделей и анализа ситуации на территориях (Scoops3D и т.д.) [Мельков, Ревазов, 2021; Бурдзиева и др., 2024 б]. Для практического строительства в горном регионе необходимо проводить детальные геофизические исследования и геолого-инженерные изыскания, что позволит исключить катастрофические последствия при возможной активизации экзогенных и иных процессов.

Выводы

1. Геоэкологическое состояние Кармадонского ущелья формируется под комплексным воздействием эндогенных (тектоническая раздробленность, сейсмичность, современные движения) и экзогенных (климат, рельеф, склоновые процессы) факторов. Ключевая роль принадлежит глубинным разломам и зонам тектонических нарушений, которые служат не только источниками геодинамической активности, но и основными каналами разгрузки термальных вод, снижающих устойчивость горных пород.

2. Важным фактором развития и последующего накопления четвертичных отложений являются эндогенные процессы. Многообразие литологического состава горных пород и активность геологических процессов обуславливают, в свою очередь, разнообразие генетических типов четвертичных отложений.

3. С помощью экспертных оценок произведены оценки вклада каждого фактора в формирование геоэкологической нагрузки и выполнено соответствующее зонирование на примере горного массива между долинами рек Гизельдон и Геналдон и прилегающими территориями.

4. Показана возможность прогноза уровня воздействия природно-техногенной нагрузки, что является основой разработки адекватных мероприятий по смягчению тяжести последствий развития опасных процессов. Полученные результаты могут служить основой для разработки высокоэффективных мероприятий по снижению геоэкологических рисков при планировании хозяйственного освоения горных территорий, выбора приоритетных участков мониторинга и инженерной защиты.

Литература

1. Бондаренко Н.А., Любимова Т.В., Стогний В.В. Интегральная оценка потенциальных геологических рисков Краснодарского края. // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2020. – Т. 26. № 2. – С. 188–200.

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. – 2024а. – Т. 14. № 4. – С. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.01.
3. Бурдзиева О.Г., Мельков Д.А., Ревазов М.О., Кортиев А.Л. Активизация оползневых процессов, обусловленная урбанизацией горных территорий. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024б. – Т. 16. № 4(62). – С. 1646–1658. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1646-1658.
4. Габараев А.Ф., Мельков Д.А., Кортиев А.Л., Козырев Е.Н. Влияние геоморфологических условий горного региона на интенсивность проявления опасных геологических процессов. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 10. № 4. – С. 198–212. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.50.016.
5. Гольцман Ф.М. Комплексирование наблюдений при распознавании геофизических объектов. // Физика Земли. – 1976. – № 7. – С. 40–54.
6. Гольцман Ф.М. Информационная содержательность эксперимента и учет корреляции нечисловых признаков при распознавании геофизических объектов. // Физика Земли. – 1980. – № 10. – С. 71–85.
7. Гончаренко О.А., Заалишвили В.Б., Караев Ю.И., Никитин М.Ю. Опасные геологические процессы Северного Кавказа. // В сборнике: Опасные природные и техногенные геологические процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа. Владикавказ: ЦГИ ВНЦ РАН и РСО-А, 2008. – С. 160–166.
8. Заалишвили В.Б. Методологические аспекты сейсмического микрорайонирования. // Теория сооружений и сейсмостойкость. ИСМИС им. К.С. Завриева АН Грузии. – Тбилиси, 2000. – С. 182–188.
9. Заалишвили В.Б., Чотчаев Х.О. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, 2022. – 230 с.
10. Мельков Д.А., Ревазов М.О. Оценка потенциальной оползневой опасности территории РСО–Алания по геоморфологическим и геологическим данным. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2021. – № 2(85). – С. 48–54.
11. Стасенко А.А., Данилин М.Н., Харченко В.М., Неркарарян А.Е. Геоморфологическое, геолого-тектоническое строение, геодинамические и экологические условия горы Машук и примыкающей территории центральной части района Кавказских Минеральных Вод. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 1. – С. 47–58. DOI: 10.46698/VNC.2023.74.77.004.
12. Стогний В.В., Стогний Г.А., Волкова Т.А., Любимова Т.В. Геоэкологические риски Северо-Западного Кавказа и их оценка. // Материалы VII Международной конференции «Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии». Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, 2019. – С. 768–772.
13. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 4. – С. 70–100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005.
14. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 1. – С. 81–94. DOI: 10.46698/VNC. 2021.15.66.007.
15. Яицкая Н.А., Дзаганя Л.М., Бригида В.С. Геоэкологические опасности в условиях климатических изменений территорий субтропической зоны Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 118–132. DOI: 10.46698/VNC.2023.54.85.010.
16. Corominas J., van Westen C., Frattini P., Cascini L., Mallet J.-P. et al. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. // Bulletin of Engineering Geology and Environment. – 2014. – Vol. 73. No. 2. – pp. 209–263.
17. Cutter S.L. Building disaster resilience: steps toward sustainability. // Challenges in Sustainability. – 2014. – Vol. 1(2). – pp. 72–79.
18. Cutter S.L., Finch C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2008. – Vol. 105(7). – pp. 2301–2306. DOI: 10.1073/pnas.0710375105.
19. Dille M., Chen R.S., Deichmann W., Lerner-Lam A.L., Arnold M. Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis. – Washington D.C.: The World Bank, 2005.

20. Jaedicke C., Van Den Eeckhaut M., Nadim F., Hervás J., Kalsnes B., Vangelsten B., Smith J., Tofani V., Ciurean R., Winter V., Thygeson K., Syre T., Smebye H. Identification of landslide hazard and risk 'hotspots' in Europe. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2014. – Vol. 73. – pp. 325–339 DOI: 10.1007/s10064-013-0541-0.

21. Vranken L., Vantilt G., Van Den Elckhaut M., Vandekerckhove L., Poesen J. Landslide risk assessment in densely populated hilly area. // *Landslides*. – 2015. – Vol. 12. No. 4. – pp. 787–798.

References

1. Bondarenko N.A., Lyubimova T.V., Stogniy V.V. Integrated assessment of potential geological risks in the Krasnodar Region. *INTERKARTO. INTERGIS*. 2020. Vol. 26. No. 2. pp. 188–200. (In Russ.)

2. Burdzieva O.G., Revazov M.O., Kortiev A.L., Gogichev R.R. Influence of geodynamic processes on the geocological load of mountain region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024a. Vol. 14. No. 4. pp. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.01. (In Russ.)

3. Burdzieva O.G., Melkov D.A., Revazov M.O., Kortiev A.L. Activation of landslide processes caused by urbanization of mountainous territories. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024b. Vol. 16. No. 4(62). pp. 1646–1658. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1646-1658. (In Russ.)

4. Gabaraev A.F., Melkov D.A., Kortiev A.L., Kozyrev E.N. Influence of geomorphological conditions of a mountain region on the intensity of hazardous geological processes. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 198–212. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.50.016. (In Russ.)

5. Goltsman F.M. Integration of observations in recognition of geophysical objects. *Physics of the Earth*. 1976. No. 7. pp. 40–54. (In Russ.)

6. Goltsman F.M. Information content of the experiment and accounting for the correlation of non-numerical features in recognition of geophysical objects. *Physics of the Earth*. 1980. No. 10. pp. 71–85. (In Russ.)

7. Goncharenko O.A., Zaalishvili V.B., Karaev Yu.I., Nikitin M.Yu. Hazardous geological processes of the North Caucasus. In: *Hazardous natural and man-made geological processes in the mountainous and foothill areas of the North Caucasus*. Vladikavkaz. CGI VSC RAS and RNO-A. 2008. pp. 160–166. (In Russ.)

8. Zaalishvili V.B. Methodological aspects of seismic microzoning. Theory of structures and seismic resistance. *ISMIS named after K.S. Zavriev*. Georgian Academy of Sciences. Tbilisi. 2000. pp. 182–188. (In Russ.)

9. Zaalishvili V.B., Chotchaev H.O. Influence of geodynamic processes on the geocological state of high-mountain territories. Vladikavkaz. GPI VSC RAS. 2022. 230 p. (In Russ.)

10. Melkov D.A., Revazov M.O. Assessment of potential landslide hazard of the territory of RNO-Alania based on geomorphological and geological data. *Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2021. Vol. 2(85). pp. 48–54. (In Russ.)

11. Stasenko A.A., Danilin M.N., Kharchenko V.M., Nerkararian A.E. Geomorphological, geological and tectonic structure, geodynamic and ecological conditions of Mount Mashuk and the adjacent territory of the central part of the Caucasus Mineralnye Vody region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 47–58. DOI: 10.46698/VNC.2023.74.77.004. (In Russ.)

12. Stogniy V.V., Stogniy G.A., Volkova T.A., Lyubimova T.V. Geocological risks of the North-West Caucasus and their assessment. In: *Proceedings of the VII International Conference "Hazardous Natural and Man-Made Processes in Mountainous Regions: Models, Systems, Technologies"*. Vladikavkaz. GPI VNC RAS. 2019. pp. 768–772. (In Russ.)

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

14. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high mountainous areas by geocological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 81–94. DOI: 10.46698/VNC. 2021.15.66.007. (In Russ.)

15. Yaitskaya N.A., Dzaganiiia L.M., Brigida V.S. Geoecological hazards in context of climate change of territories of Caucasus subtropical zone. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 118–132. DOI: 10.46698/VNC.2023.54.85.010. (In Russ.)
16. Corominas J., van Westen C., Frattini P., Cascini L., Mallet J.-P. et al. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*. 2014. Vol. 73. No. 2. pp. 209–263.
17. Cutter S.L. Building disaster resilience: steps toward sustainability. *Challenges in Sustainability*. 2014. Vol. 1(2). pp. 72–79.
18. Cutter S. L., Finch C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2008. Vol. 105(7). pp. 2301–2306. DOI: 10.1073/pnas.0710375105.
19. Dilley M., Chen R.S., Deichmann W., Lerner-Lam A.L., Arnold M. *Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis*. Washington D.C. The World Bank. 2005.
20. Jaedicke C., Van Den Elckhaut M., Nadim F., Hervas J., Kalsnes B., Vangelsten B., Smith J., Tofani V., Ciurean R., Winter V., Thygeson K., Syre T., Smebye H. Identification of landslide hazard and risk ‘hotspots’ in Europe. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2014. Vol. 73. pp. 325–339. DOI: 10.1007/s10064-013-0541-0.
21. Vranken L., Vantilt G., Van Den Elckhaut M., Vandekerckhove L., Poesen J. Landslide risk assessment in densely populated hilly area. *Landslides*. 2015. Vol. 12. No. 4. pp. 787–798.

УДК 911.52

DOI: 10.46698/VNC.2026.12.42.002

Оригинальная статья

Аридные ландшафты – специфический элемент высотно-поясной структуры восточной части Центрального Кавказа

Д.И. Тебиева¹, В.В. Доброносков^{2,3}

¹ Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, Россия, 362025, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 44-46, e-mail: d_tebieva@mail.ru;

² Национальный музей РСО-Алания, Россия, 362040, г. Владикавказ, Пр. Мира, 7-11, e-mail: dobronosov@mail.ru;

³ Заповедная Осетия – Алания, Россия, 363240, г. Алагир, ул. Ч. Басиевой, 1

Статья поступила: 01.10.2025, доработана: 10.03.2026, принята к публикации: 13.03.2026

Резюме: Актуальность. Активизация внутреннего туризма в России привела к многократному увеличению рекреационной нагрузки на горные районы Кавказа. Под угрозой разрушения оказались наиболее уязвимые аридные сухостепные и нагорно-ксерофитные формации, являющиеся местообитанием многих видов организмов и создающие своеобразный высотно-поясной ряд на склонах южной экспозиции. **Цель** – сохранение ландшафтного и биологического разнообразия путем организации соответствующего экосистемного менеджмента. **Методы.** Ретроспективный анализ экологического состояния аридных ландшафтов проводился в соответствии с современными методологическими подходами к проблемам устойчивости и уязвимости экосистем. Традиционные методы: маршрутный, пробных площадок и экстраполяции – применялись для выявления изменений в составе, структуре и продуктивности фитоценозов. **Результаты.** Исследования показали: за указанный период произошла утеря некоторых видов растений, что связано с бесконтрольным выпасом домашнего скота и, возможно, с естественным эволюционным процессом, но одновременно наблюдалось восстановление ранее исчезнувших и появление новых растительных и животных элементов. **Выводы.** В республике наблюдается смена традиционного природопользования на рекреационное, при этом остается актуальной проблема сохранения устойчивого состояния аридных экосистем. Для поддержания тенденции самовосстановления естественных ландшафтов, необходимо применить экосистемный менеджмент, первым шагом к которому должно стать расширение площади особо охраняемых природных территорий на восток до государственной границы РСО-Алания. Официальное придание охранного статуса наиболее уязвимым ландшафтам позволит более эффективно управлять туристскими потоками, ограничивать эксплуатацию пастбищных и сенокосных угодий, поддерживать на необходимом гомеостатическом уровне биоразнообразие территории.

Ключевые слова: аридные системы, горные степи, нагорные ксерофиты, устойчивость фитоценозов, природоохранный менеджмент, Республика Северная Осетия-Алания.

Для цитирования: Тебиева Д.И., Доброносков В.В. Аридные ландшафты – специфический элемент высотно-поясной структуры восточной части Центрального Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 228-239. DOI: 10.46698/VNC.2026.12.42.002

DOI: 10.46698/VNC.2026.12.42.002

Original paper

Arid landscapes are a specific element of the high-belt structure of the eastern part of the Central Caucasus

D.I. Tebieva¹, V.V. Dobronosov^{2, 3}

¹ North Ossetian State University after K.L. Khetagurov, 44-46 Vatutin Str., Vladikavkaz 362025, Russian Federation, e-mail: d_tebieva@mail.ru;

² National Museum of North Ossetia-Alania, 7-11 Pr. Mira, Vladikavkaz 362040, Russian Federation, e-mail: dobronosov@mail.ru;

³ Reserved Ossetia – Alania, 1 Ch. Basieva Str., Alagir 363240, Russian Federation

Received: 01.10.2025, revised: 10.03.2026, accepted: 13.03.2026

Abstract: Relevance. The growth of domestic tourism in Russia has led to a multiple increase in the recreational load on the mountainous regions of the Caucasus. The most vulnerable arid dry-steppe and upland xerophytic formations, which are the habitat of many organism's species and create a kind of high-altitude series on the southern exposure's slopes, were threatened with destruction. **The aim** is to preserve landscape and biological diversity by organizing appropriate ecosystem management. **Methods.** Retrospective analysis of the arid landscapes ecological state was carried out in accordance with modern methodological approaches to the problems of sustainability and vulnerability of ecosystems. Traditional methods: route, trial sites and extrapolation – were used to identify changes in the composition, structure and productivity of phytocenoses. **Results.** Studies have shown, that some plant's species were lost, which is associated with uncontrolled grazing of livestock and, possibly, with the natural evolutionary process, but at the same time, the restoration of previously disappeared and the emergence of new plant and animal elements was observed. **Conclusions.** There is a change in traditional nature management to recreational, while the problem of preserving the stable state of arid ecosystems remains relevant. To maintain the trend of self-restoration of natural landscapes, it is necessary to apply ecosystem management, the first step to which should be the expansion of the specially protected natural areas east to the state border of republic. The official conservation's granting status to the most vulnerable landscapes will make it possible to more effectively manage tourist flows, limit the exploitation of pasture and hayfields, and maintain the territory's biodiversity at the required homeostatic level.

Keywords: arid systems, mountain steppes, upland xerophytes, resistance of phytocenoses, environmental management, Republic of North Ossetia-Alania.

For citation: Tebieva D.I., Dobronosov V.V. Arid landscapes are a specific element of the high-belt structure of the eastern part of the Central Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 228-239. DOI: 10.46698/VNC.2026.12.42.002

Введение

Орография восточной части Центрального Кавказа, по сравнению со смежными территориями, обладает некоторыми особенностями, а именно, максимально сближенным расположением параллельных хребтов, заметно сужающим, разделяющие их, продольные депрессии, большой крутизной склонов, смещением водоразделов наиболее крупных рек (Терек и Ардон) на южный макросклон Большого Кавказа, погружением Передового хребта, разнонаправленными движениями отдельных блоков (Тарская котловина), сочетанием моноклинальных и складчатых движений и другими локальными деформациями. В формировании указанных морфоструктур решаю-

шая роль принадлежит геодинамическим процессам, а именно коллизии между Аравийской и Скифской литосферными плитами и зажатой между ними шовной зоной Большого Кавказа [Стогний, Стогний, 2023].

Близкое расположение хребтов, разделенных узкими продольными депрессиями, приводит к многочисленным физико-географическим последствиям, главное из которых усиление эффектов «барьерного подножья» и «барьерной тени» на склонах противоположных экспозиций. Особенно резко барьерные различия проявляются в среднегорьях (1200–2000 м над ур. м.). Так, на склонах северной экспозиции на Скалистом хребте господствует пояс широколиственных буково-грабовых лесов, а на тех же высотах, за Скалистым хребтом на склонах южной экспозиции формируются горные лугово-степные ландшафты, сухие горные степи и нагорные ксерофиты [Тебиева, 2013]. Сухостепные и нагорно-ксерофитные формации вносят большой вклад в ландшафтное и биологическое разнообразие территории Северной Осетии, для сохранения которого необходимы мониторинг и защита их от антропогенного воздействия.

Материалы и методы

Исходными материалами послужили многолетние исследования авторами состава, структуры и динамики отдельных природных компонентов и комплексов территории Центрального Кавказа, их реакций на антропогенные воздействия [Добронос, 2022; Тебиева, 2013]. Динамические процессы в почвенно-растительном покрове аридных ландшафтов за последний почти 80-летний период исследовались на основе системного и комплексного подходов, позволяющих рассматривать экосистемы с позиций множественности устойчивых состояний, свойственных сложным структурам [Пригожин, Стенгерс, 1986; Шадрин, 2012], каковыми являются экосистемы.

В основу оценки устойчивости фитоценозов к внешним и внутренним воздействиям, положены сформировавшиеся к настоящему времени представления о различных фазах или стадиях устойчивого состояния в пределах определенного пространственно-временного континуума и о, поддерживающих устойчивость, резилентных особенностях сообщества [Braun-Blanquet, 1964; Кореску, Нежну, 1974; Holling, 1973; Holling et al., 1995; Шадрин, 2012]. Степень измененности исследуемых фитоценозов определялась путем ретроспективного анализа флористического состава ранее опубликованных материалов [Богданов, 1950; Шифферс, 1953; Амирханов и др., 1981; Грачева и др., 2017; Белоус, Николаев, 2011; Петрушина, Гуля, 2021] и полевых исследований 2020–2025 годов. Наряду с изучением естественных растительных сообществ, проводилась оценка форм природопользования и других аспектов хозяйственной деятельности.

Результаты и обсуждение

Объекты исследования представляют собой небольшие пятна аридных геосистем, приуроченные к днищам внутригорных котловин на высотах от 900 до 1400 м над ур. м., образовавшихся в северной продольной депрессии, разделяющей Боковой и Скалистый хребты. С юга депрессия ограничена тектоническими уступами склонов Бокового хребта, а на севере – обрывом Скалистого хребта (рис. 1).

Северная продольная депрессия в тектоническом отношении представляет собой сложно устроенный грабен, состоящий из цепочки впадин, разделенных узкими поперечными горстами, которые в рельефе являются контрфорсными перемычками между Боковым и Скалистым хребтами. Мозаичная тектоническая структура самих впадин (котловин) объясняется интенсивно протекающими до настоящего времени тектоническими процессами. Современные тектонические структуры разбиты многочисленными продольными и поперечными разломами и трещинами, на отдельные блоки, совершающие разнонаправленные вертикальные и горизонтальные движения [Растворова, 1973].

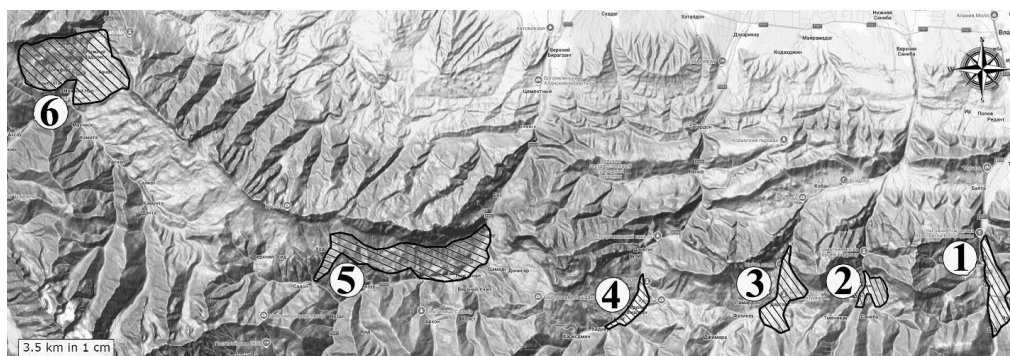


Рис. 1. Карта-схема расположения аридных котловин: 1 – Чмийская, 2 – Кармадонская, 3 – Даргавская, 4 – Верхне-Фиэгдонская, 5 – Садано-Унальская, 6 – Задалесская
Топооснова Google Terrain (<https://nakarte.me/#m=11/42.90363/44.24881&l=P>) /

Fig. 1. Layout map of arid basins: 1 – Chmiyskaya, 2 – Karmadonskaya, 3 – Dargavskaya, 4 – Verhne-Fiagdonskaya, 5 – Sadono-Unalskaya, 6 – Zadalesskaya
Google Terrain (<https://nakarte.me/#m=11/42.90363/44.24881&l=P>)

Котловины сложены нижнеюрскими легкоразмываемыми глинистыми сланцами и песчаниками, покрытыми мощным плащом переотложенных обломков, генетически разнородных четвертичных отложений.

Моноклираль Скалистого хребта с высотами от 2800 до 3500 м над ур. м., сложенная средне- и верхнеюрскими известняками, к югу обрывается мощным эскарпом (до 500–800 м): превышения над днищами котловин местами достигают 1500–1800 м. Почти отвесный южный склон Скалистого хребта продуцирует многочисленные осыпи, обвалы, продукты выветривания, покрывающие склоны и накапливающиеся у подножья, прикрывая коренные породы (рис. 2).

Рельеф котловин представляет собой четко очерченные внутригорные относительно пониженные образования, со всех сторон окруженные хребтами, имеющие выход на севере в виде узких каньонов в Скалистом хребте. Замкнутость котловин определяет их особые климатические условия. В отличие от влажного северного склона Центрального Кавказа с атмосферными осадками, достигающими 1000 и более мм/год, в котловинах выпадает не более 450–500 мм/год, что сказывается на почвенно-растительном покрове.

Наиболее характерными формами мезорельефа котловин, рассматриваемых в качестве макроформ, являются речные долины, конусы выноса и склоны различные по своему геоморфологическому устройству и занимающие наибольшую площадь.



Рис. 2. Эскарп Скалистого хребта (фото В. Доброносова) /
Fig. 2. Escarp of the Skalisty Ridge (photo by V. Dobronosov)

В каждой котловине имеется только одна хорошо разработанная и глубоко врезанная долина главной реки, долины ее притоков в большинстве своем слабо разработаны, имеют V-образный глубоко врезанный профиль, неразвитые поймы и террасы. Средняя протяженность долин в пределах котловин не превышает 7–9 км, падение, в целом, меридиональное – с юга на север. Характерной чертой этих отрезков долин является достаточно хорошо развитая пойма и надпойменные террасы.

Конусы выноса селевых потоков различаются по возрасту и представляют практический интерес. Древние конусы выноса, имеющие выровненные поверхности, покрыты лугово-степными почвами на желто-бурых суглинках, издавна освоены человеком под поселения и для ведения приусадебного хозяйства.

Конусы выноса действующих селей могут представлять опасность для населенных пунктов, дорожно-транспортной сети, газопроводов, линий электропередачи и т.п., так как периодичность и интенсивность проявления селевых потоков, выявленные ранее, к настоящему времени устарели и не соответствуют произошедшим за последние десятилетия климатическим изменениям.

Большой интерес вызывают террасированные склоны котловин. Долгое время эти формы рельефа воспринимались как рукотворные сельскохозяйственные террасы, в подтверждение данной точки зрения приводилось террасное земледелие во внутреннем Дагестане, однако в соседней Чечне факты террасирования склонов под земледелие не выявлены [Петров, 2023]. На территории Северной Осетии террасного земледелия (с созданием рукотворных террас) не существовало. В очень ограниченном количестве относительно выровненные фрагменты нагорных террас, расположенных вблизи селений, местные жители использовали: в прошлом для выращивания зерновых, а сейчас – овощей и картофеля. Природные ступени террас имеют разную ширину, различный наклон поверхностей относительно горизонтали, различное превышение между уступами.

Исследование аккумулятивной толщи ленточных алевритоглинистых отложений древнего Актопракского озера на р. Чегем в Кабардино-Балкарии, а также озерных отложений во внутригорных котловинах РСО-Алания, доказывает лимнологическое происхождение склоновых террас [Тимофеева, 1960; Растворова, 1973; Тавасиев, 2010].

Террасированные склоны с разной степенью сохранности можно наблюдать во всех котловинах на абсолютных высотах 1350–1500 м (рис. 3).



Рис. 3. Озерные террасы в Чмийской котловине (фото Р. Тавасиева) /

Fig. 3. Lake terraces in the Chmiyskyj Basin (photo by R. Tavasiev)

Климат котловин формируется в условиях, так называемой, «дождевой тени», создаваемой Скалистым хребтом, и характеризуется большим количеством солнечных дней, хорошей прогреваемостью склонов южной и юго-западной экспозиций, что особенно ощущается в холодное время. Самый теплый месяц июль с температурой в среднем $+15,8^{\circ}\text{C}$, самый холодный месяц январь $-3,9^{\circ}\text{C}$. Годовая сумма осадков, в нижних частях склонов не превышает 370–500 мм. Максимум осадков приходится на май-июнь (60–75 мм), минимум – на декабрь-январь (8–16 мм) [Агроклиматический справочник ..., 1960]. Сухость климата усиливается большой крутизной склонов, по которым влага быстро стекает, не успевая впитаться в грунт.

Оценки динамики климатических показателей выявили тенденцию роста температур, тогда как динамика осадков проявилась лишь в перераспределении их по сезонам: уменьшение – летом и нарастание – осенью [Айларов, 2024].

Почвенно-растительный покров внутригорных котловин в целом формируется в условиях недостаточного увлажнения, а его разнообразие обусловлено разнообразием геолого-геоморфологических особенностей, из которых основными являются: подстилающие породы, крутизна и экспозиция склонов.

Под лугами, в разной степени ксерофитизированными, формируются горностепные почвы, располагающиеся полосами шириной до 2 км от Скалистого хребта на юг вверх по рекам до Бокового хребта [Молчанов, Бясов, 1990]. В разных котловинах верхняя граница этих почв колеблется в зависимости от глубины вреза основной реки и от степени закрытости котловин. Так, на склонах северной экспозиции она располагается на высотах 1200–1500 м над ур. м., а на противоположных склонах поднимается до 1350–1550 м над ур. м. По боковым притокам эти почвы формируются только на склонах южной экспозиции.

Основная разновидность горностепных почв имеет следующие морфологические признаки: коричневая окраска профиля, ореховатая структура, наличие уплотненного горизонта на глубинах от 15–20 до 30–35 см, появление выцветов углекислых солей с глубины 30–35 см, с глубины 35 см располагается желто-бурый бесструктурный суглинок.

На крутых и выпуклых склонах разной экспозиции среди выходов коренных пород формируются светло-коричневые перегнойно-карбонатные слаборазвитые щебневатые почвы под луговыми степями, представленными двумя разновидностями: на высотах 1400 м над ур. м. и выше – злаково-разнотравно-осочковая лугостепь с эспарцетом каменным, а ниже, на высотах 1000–1600 м над ур. м. – осочково-типчакковая. Таким образом, в направлении к днищу котловин усиливается засушливость и лугостепь приобретает более ксерофитный характер.

На выположенных поверхностях древних конусов выноса и надпойменных террас естественные почвенно-растительные формации злаково-разнотравно-осочковых луговых степей значительно изменены хозяйственной деятельностью. Несмотря на мизерные размеры участков (3–5 га), они позволяют местным жителям выращивать овощные (в том числе, картофель) и злаковые культуры (кукурузу), заниматься садоводством.

Для всех котловин северной юрской депрессии, с востока на запад сменяющих друг друга: Чмийская, Кармадонская, Даргавская, Верхне-Фиагдонская, Садоно-Унальская, Задалесская – характерен безлесный ландшафтный фон. Однако, в прошлом склоны северных экспозиций на высотах 1250–1300 м над ур. м. были покрыты сосновыми лесами, располагающимися в непосредственной близости от поселений, которые постепенно вырубались для хозяйственных нужд и замещались вторичной растительностью – субальпийскими березняками с доминантами из березы бородавчатой (*Betula verrucosa* Ehrh.), березы Радде (*B. raddeana* Trautv.), березы Литвино-

ва (*B. litwinowi* A. Dol.) и сопутствующими видами: рябина кавказородная (*Sorbus caucasigenus* Kom.), осина (*Populus tremula* L.), барбарис (*Berberis vulgaris* L.), лещина (*Corylus avellana* L.), ежевика (*Rubus coesius* L.) и волчегородник (*Daphne glomerata* Lam.). На верхней границе березняков сопутствующими становятся несколько видов ивы: казбекская (*Salix kazbekensis* Askob.), козья (*S. caprea* L.) и Кузнецова (*S. kuznezovii* Laksch.), требующие больше влаги.

Противоположные склоны – нижние части южного склона Скалистого хребта – также когда-то покрывались коренными сообществами сосново-дубового редколесья, но, вследствие вырубок и чрезмерного выпаса домашнего скота, редколесье было замещено, так называемой, фриганой. Для установления ее флористического состава было описано несколько пробных площадок в 100 м² в Верхне-Фиагдонской котловине вблизи населенных пунктов. Доминантом и эдификатором фриганы является шалфей дагестанский (*Salvia daghestanica* Sosn.), сплошь покрывающий склоны южной, юго-восточной и восточной экспозиций. Из других видов наиболее характерными являются: тонконог (*Koeleria gracilis* Pers), ковыль волосатик (*Stipa capillaris* L.), астрагал австрийский (*Astragalus austriacus* Jacq.), эспарцет скальный (*Onobrychis petraea* (M. Bieb. ex Willd.) Fisch.), проломник бородчатый (*Androsace barbulata* Ovcz.), пупавка Маршалла (*Anthemis marschallianus* W.), полыни австрийская и веничная (*Artemisia austriaca* Jacq., *A. scoparia* W. et K.), молочай грузинский (*Euphorbia iberica* Boiss.), дубровники восточный и белый (*Teucrium orientalis* L., *T. polium* L.).

Кустарниковый ярус представлен несколькими видами можжевельника (*Juniperus sabina* L., *J. oblonga* Bieb., *J. depressa* Stev), хвойником рослым (*Ephedra procera* F. et M.), жостером Палласа (*Rhamnus pallasii* F. et M.) – они встречаются единично и разбросано.

Типичные нагорные ксерофиты распространены во всех внутригорных депрессиях на склонах южных экспозиций на высотах от 800 до 2300 м над ур. м., вытесняя все остальные пояса [Белоус, Николаев, 2011].

Нагорные ксерофиты с преобладанием трагакантовых астрагалов произрастают на примитивных недоразвитых светло-каштановых почвах со смывами и выходами коренных пород на высотах 1100–1700, а кое-где более 2000 м над ур. м. на склонах большой крутизны.

У подножья Скалистого хребта (800–1400 м над ур. м.) на делювии известняков в нагорных ксерофитах преобладают шалфей седой и осочка.

Особую редкость на территории Северной Осетии представляют настоящие полынные и полынно-злаковые горные степи, сформировавшиеся на склонах южной и восточной экспозиции на карбонатных каменисто-хрящеватых недоразвитых почвах, материнской породой которых служит делювий известняков (800–1000 м над ур. м.). Указанные формации распространены исключительно в самой западной Задалесской котловине.

Скалистый хребет, достигающий здесь максимальной для Северной Осетии высоты – более 3500 м над ур. м., образует сплошную стену, непреодолимую для влажных воздушных масс с севера, даже при наличии каньона, проработанного р. Урух, но чрезвычайно узкого – чуть более 15 метров. В результате таких геоморфологических особенностей Скалистый хребет нарушает даже общекавказскую закономерность – усиление континентальности и аридности климата с запада на восток, наблюдаемую как для северных, так и для южных экспозиций Большого Кавказа. Но, на отрезке от междуречья рек Черек и Урух до долины Терека, аридность климата внутригорных котловин усиливается в обратном направлении – с востока на запад, благодаря усилению эффекта барьерной «тени». Выше по склонам на осыпях, повсеместно покрыва-

вающих эскарп Скалистого хребта, наиболее важным и преобладающим элементом растительного сообщества является овсяница жестколистная (*Festuca sclerophylla* Boiss.ex Bisch.), не переносящая избытка влаги, засухоустойчивая, которая, благодаря своей корневой системе: короткий центральный стержень и длинные боковые корни, – способна закреплять подвижные грунты.

Наиболее характерные для Северной Осетии нагорно-ксерофитные сообщества исследованы в Верхне-Фиагдонской котловине, где они распространены на высотах 1150–1400 м над ур. м. Пробные площадки размером 100 м² закладывались на склонах южной, восточной и юго-восточной экспозиций. Нагорные ксерофиты представлены трагакантниками – группировками, образованными колючими кустарниками, выделяющимися своей серо-зеленой окраской и характерной подушкообразной формой. Эдификатором трагакантников в Северной Осетии является астрагал Маршала (*Astragalus marschallianus* Fisch.), относящийся к многочисленному роду семейства бобовых. Из сопутствующих растений следует указать: типчак (*Festuca sulcata* L.), лен восточный (*Linum orientale* Boiss.), тимьян холмовый (*Thymus collinus* Bieb.), несколько видов ластовеня (*Vincetoxicum schmalhauseni* Kusn.; *V. rehmanni* Boiss.; *V. laxum* Bartl.; *V. scandens* Somm et Lev.), полыни австрийская и горькая (*Artemisia austriaca* Jacq., *A. Absinthium* L.), молочай острый (*Euphorbia esula* L.), подмаренник настоящий (*galium verum* L.), тимopheвка степная (*Phleum phleoides* Dsimk.), тонконог изящный (*Koeleria gracilis* Pers).

Примечательно, что ластовни сопровождают трагакантники только в средней и верхней частях склонов, в нижних – они образуют чистые заросли, не поедаемые скотом, видимо, из-за неприятного запаха, а возможно, из-за содержащегося в них яда, особенно опасного для овец, хотя одним из латинских названий рода ластовней является *Antitoxicum* (противоядие).

Повсеместно встречающиеся во внутригорных котловинах трагакантовые астрагалы находят широкое применение в медицине, пищевой промышленности, благодаря трагаканту – полисахариду, выделяемому при повреждении растения, выполняющего функцию стабилизатора, загустителя, эмульгатора, но в отличие от смол других растений, трагакант водорастворим. Но в сообществах нагорных ксерофитов трагакантники выполняют еще более важную роль – их пахикуальная древесина служит промежуточным местообитанием для многих насекомых.

Из краснокнижных растений трагакантников следует отметить эфедру рослую (хвойник) – типичный ксерофит, реликтовое растение, сохранившееся с доледниковых эпох, является голосеменным, но настолько не похоже на своих сородичей, что образует самостоятельное семейство эфедровых (Ephedraceae). В настоящее время эфедра рослая нечасто встречается в котловинах по долинам рек Урух, Ардон и Терек, что связано с чрезмерным выпасом и использованием стеблей кустарника для бытовых нужд в прошлом, а народная медицина и сейчас активно использует ягоды эфедры. Внешняя привлекательность этого растения может стать угрозой для ее естественного произрастания, в связи с широким использованием в ландшафтном дизайне.

Следует отметить, что не все сообщества нагорных ксерофитов попали в поле нашего внимания, так, например, нагорные ксерофиты с преобладанием зизифоры головчатой (*Ziziphora capitata* L.) и тимьяна монетчатого (*Thymus nummularius* M. Bieb.) на недоразвитых светло-каштановых каменистых почвах крутых склонов южных экспозиций (1700–2300 м над ур. м.) и поляны нагорных ксерофитов среди можжевельника казацкого на крутых смытых каменистых почвах склонов преимущественно южной экспозиции (1600–2000 м над ур. м.), которые встречаются только в южной юрской депрессии в Зарамагской котловине. В настоящее время дно котло-

вины представляет собой водохранилище Зарамагской ГЭС, что ведет к увеличению абсолютной влажности воздуха, и, возможно, со временем заработает адаптивный механизм замены ксерофитов на мезофиты, что приведет к олуговению экосистемы [Scheffer et al., 2009; Schmitz, 2010].

Одним из важных аспектов изучения современного состояния аридных ландшафтов РСО-Алания является мониторинг необходимого уровня биоразнообразия, который, при прочих равных условиях, а также на фоне непредвиденных фактов и факторов негативного воздействия на природные компоненты и комплексы, позволит сохранить устойчивость экосистемы в целом и ее отдельных таксонов [Holling et al., 1995].

Небольшая по площади Северная Осетия занимает одно из первых мест в России по биоразнообразию (основным конкурентом является Кабардино-Балкария). На территории республики выявлено 2206 видов сосудистых растений, из них 448 видов цветковых растений произрастает на лугах, 336 видов – обитатели каменистых грунтов (скалы, осыпи, щебнистые почвы). Кроме того, в составе флоры Северной Осетии имеются 306 эндемичных и 103 реликтовых вида. Наряду с широко распространенными в умеренном поясе семействами, такими как астровые, мятликовые, лютиковые, яснотковые и многие другие, в РСО-Алания встречаются растения характерные для тропических широт: вербеновые, ароидные, молочайные. Такие семейства, как тисовые, представлены лишь одним видом – тисом ягодным, эфедровые и кизилловые – эфедрой розлой (хвойник) и кизилом соответственно.

Сухостепные и нагорно-ксерофитные формации, занимающие в основном днища внутригорных котловин, на которые приходится всего 8,4 % площади республики, являются местообитаниями, внесённых в Красную Книгу РСО-Алания, эндемичных и редких организмов: 20 видов сосудистых растений и один вид мха, беспозвоночных животных насчитывается 60 видов [Красная книга ..., 2022]. Кроме того, аридные экосистемы увеличивают пейзажное разнообразие, усиливают контрастность ландшафтов, вносят существенный вклад в биоразнообразие территории РСО-Алания.

Выводы

Ретроспективный анализ флористического состава аридных экосистем (трагакантников, фриганы, лугово-степных сообществ) выявил их хорошие восстановительные способности, основанные на содержании одного или нескольких компонентов, позволяющих сохранять гомеостаз фитоценоза независимо от уровня антропогенной нагрузки [Розенберг и др., 2023].

Из этого также следует, что все варианты ксерофитных сообществ, представленные ныне в межгорных депрессиях за Скалистым хребтом, являются адаптированными к конкретным условиям местообитаний альтернативными состояниями, зародившейся на определенном историческом этапе исходной формы. Поддержание устойчивого состояния рассмотренных фитоценозов, несмотря на выявленные колебания в сторону ухудшения (дигрессия пастбищ, тропинчатая эрозия, остепнение лугов) или улучшения (восстановление травостоя, расширение верхней и нижней границ лесного пояса), возможно в том случае, когда экосистемы находятся в когерентной стадии, то есть, когда внутренние и внешние связи экосистемы сильны и способны противостоять этим колебаниям, сохраняя динамическое равновесие, то есть устойчивость [Шадрин, 2012].

Для сохранения сложившегося достаточно устойчивого состояния экосистем необходимо содействовать организации соответствующего менеджмента: законодательно ограничить эксплуатацию пастбищных и сенокосных угодий, настоятельно требовать от местных жителей и сельхозпроизводителей введения системы огоражи-

вания используемых участков. Превентивно создать условия для защиты природных и культурно-исторических памятников, путем расширения площади особо охраняемых природных территорий на восток в Верхне-Фиагдонскую и Даргавскую котловины с включением Геналдонской, Кобанской и Кармадонской котловин, прилегающих с юга, востока и севера к Даргавской котловине. Предлагаемая форма ООПТ – геопарк, который, в отличие от других форм, природоохранный акцент делает на геолого-геоморфологические объекты и процессы. Геопарк предполагает ограничения на определенные виды хозяйственной деятельности и поддержание традиционных форм природопользования, сохранение привычного образа жизни местного населения, его духовной культуры, поддерживает развитие туризма, образовательной, воспитательной и научной деятельности на своей территории. Расширение ООПТ на восток превратит практически всю горную часть республики в особо охраняемую зону с разнообразными формами: заповедник, заказники, геопарк. Официальное придание охрannого статуса горным ландшафтам позволит более эффективно управлять туристскими потоками, хозяйственной деятельностью и поддерживать на необходимом уровне биоразнообразие территории.

Предложенная модель природоохранного менеджмента будет способствовать сохранению специфической двухрядной структуры высотной поясности восточной части Центрального Кавказа.

Литература

1. Агроклиматический справочник по Северо-Осетинской АССР. Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 120 с.
2. Айларов А.Е. Сравнительная динамика температур Центрального Кавказа и Предкавказья по периодам всемирной метеорологической организации на метеостанциях «Моздок» и «Владикавказ». // Успехи современного естествознания. – 2024. – № 7. – С. 90–97.
3. Амирханов А.М., Тавасиев Р.А., Тебиева Д.И. Карта растительности Северо-Осетинского государственного заповедника. В сборнике: Природа и природные ресурсы Центральной и Восточной части Северного Кавказа. Орджоникидзе: СОГУ, 1981. – С. 137–142.
4. Белоус В.Н., Николаев И.А. К флоре и растительности трагакантников Чмийской котловины (долина Терека). В сборнике: Актуальные проблемы экологии. Владикавказ: СОГУ, 2011. – С. 19–26.
5. Богданов В.М. Природные кормовые ресурсы Северо-Осетинской АССР. В книге: Природные ресурсы Северо-Осетинской АССР. М.: Изд-во АН СССР, 1950. – С. 328–355.
6. Грачева Р.Г., Белоновская Е.А., Виноградова В.В., Шоркунов И.Г. Конвергенция растительного покрова и почв постагрогенных экосистем межгорных котловин Центрального Кавказа. // Известия Российской Академии наук. Серия географическая. – 2017. – № 6. – С. 103–113.
7. Доброносков В.В. Выполнение поисковых научных исследований: инвентаризация энтомофауны Национального парка «Алания». В сборнике: Научные исследования в заповедниках и национальных парках Российской Федерации (2015–2021 гг.). Симферополь: «ВНИИ Экология», 2022. – С. 359–360.
8. Красная книга Республики Северная Осетия-Алания. / Отв. ред. А.Л. Комжа. – Владикавказ: Перо и Кисть, 2022. – 356 с.
9. Молчанов Э.Н., Бясов К.Х. Почвенный покров Северо-Осетинской АССР: брошюра. / Пояснительный текст к Почвенной карте Северо-Осетинской АССР. М.: ГУГК СССР, 1990. – 21 с.
10. Петров Л.А. Геологические и геоморфометрические факторы формирования ареалов земледельческих террас среднегорной Чечни. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 162–176. DOI: 10.46698/VNC.2023.72.33.013.
11. Петрушина М.Н., Гуня А.Н. Семиаридные межгорные котловины Северного Кавказа: ландшафты и трансформация землепользования. // Аридные экосистемы. – 2021. – Т. 27. № 4(89). – С. 32–40.

12. Растворова В.А. Формирование рельефа гор (на примере Горной Осетии). М.: Наука, 1973. – 145 с.
13. Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д., Розенберг А.Г. Иерархия экологических гомеостазов как принцип системологии. // Известия Российской Академии наук. Серия биологическая. – 2023. – № 7. – С. 118–128. DOI: 10.31857/S1026347023600231.
14. Стогний Г.А., Стогний В.В. Южная граница Скифской плиты в системе блоковой делимости консолидированной коры Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2023.96.83.001.
15. Тавасиев Р.А. К вопросу о происхождении террас на склонах межгорных котловин Северной Осетии. // Вестник Владикавказского научного центра. – 2010. – Т. 10. № 4. – С. 36–41.
16. Тебиева Д.И. Ландшафты восточной части Центрального Кавказа и их хозяйственная оценка. Владикавказ: Изд-во СОГУ, 2013. – 200 с.
17. Тимофеева З.В. Конкреции актопракской толщи р. Чегем и длительность процесса их образования. // Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. – 1960. – № 7. – С. 43–44.
18. Шифферс Е.В. Растительность Северного Кавказа и его природные кормовые угодья. М.: Изд-во АН СССР, 1953. – 368 с.
19. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: новый диалог человека с природой. М.: Прогресс, 1986. – 432 с.
20. Шадрин Н.В. Динамика экосистем и эволюция: множественность устойчивых состояний и точки опрокидывания / невозврата. Необходимость нового понимания. // Морской экологический журнал. – 2012. – Т. 11. № 2. – С. 85–95.
21. Braun-Blanquet J. Pflanzensociologie. New York: Wien, 1964. – 865 p.
22. Holling C.S. Resilience and stability of ecological systems. // Annual Review Ecology and Systems. – 1973. – Vol. 4. – pp. 1–23.
23. Holling C. S., Schindler D. W., Walker B. W., Roughgarden J. Biodiversity in the functioning of ecosystems: an ecological synthesis. In: Biodiversity Loss: Economic and Ecological Issues. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. – pp. 44–83.
24. Kopecky K., Hejny S. A new approach to the classification of anthropogenic plant communities. // Vegetatio. – 1974. – Vol. 29. – pp. 17–20.
25. Scheffer M., Bascompte J., Brock W.A., Brovkin V. Early-warning signals for critical transitions. // Nature. – 2009. – Vol. 461. – pp. 53–59.
26. Schmitz O.J. Resolving ecosystem complexity. Princeton: Princeton University Press, 2010. – 192 p.

References

1. Agroclimatic reference book on the North Ossetian Autonomous Soviet Socialist Republic. 1960. Leningrad. Gidrometeoizdat. 120 p. (In Russ.)
2. Ailarov A.E. Comparative temperature dynamics of the Central Caucasus and Ciscaucasia by periods of the world meteorological organization at the Mozdok and Vladikavkaz meteorological stations. Advances in Current Natural Sciences. 2024. No. 7. pp. 90–97. (In Russ.)
3. Amirkhanov A.M., Tavasiev R.A., Tebieva D.I. Vegetation map of the North Ossetian State Reserve. In: Nature and natural resources of the Central and Eastern parts of the North Caucasus. Ordzhonikidze. North Ossetian State University. 1981. pp. 137–142. (In Russ.)
4. Belous V.N., Nikolaev I.A. To the flora and vegetation of tragacanth of the Chmiyskaya depression (Terek valley). In: Actual environmental problems. Vladikavkaz. North Ossetian State University. 2011. pp. 19–26. (In Russ.)
5. Bogdanov V.M. Natural feed resources of the North Ossetian Autonomous Soviet Socialist Republic. In: Natural resources of the North Ossetian Autonomous Soviet Socialist Republic. Moscow. Published by the Academy of Sciences of the USSR. 1950. pp. 328–355. (In Russ.)
6. Gracheva R.G., Belonovskaya E.A., Vinogradova V.V., Shorkunov I.G. Convergence of vegetation and soils of intermontane basins of the Central Caucasus. Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya. 2017. No. 6. pp. 103–113. (In Russ.)

7. Dobronosov V.V. Performing exploratory scientific research: inventory of entomofauna of the Alania National Park. In: Scientific research in reserves and national parks of the Russian Federation (2015–2021). Simferopol. VNII Ecology. 2022. pp. 359–360. (In Russ.)
8. Red Book of the Republic of North Ossetia-Alania. Ed. A.L. Komzha. Vladikavkaz. Pero i Kist'. 2022. 356 p. (In Russ.)
9. Molchanov E.N., Byasov K.Kh. Soil cover of the North Ossetian Autonomous Soviet Socialist Republic: brochure. Explanatory text to the Soil map of the North Ossetian Autonomous Soviet Socialist Republic. Moscow. Main Directorate of Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the USSR. 1990. 21 p. (In Russ.)
10. Petrov L.A. 2023. Geological and geomorphometric factors in the formation of agricultural terraces in mid-mountain Chechnya. *Geology and geophysics of Russian South*. Vol. 13. No. 4. pp. 162–176. DOI: 10.46698/VNC.2023.72.33.013 (In Russ.)
11. Petrushina M.N., Gunya A.N. Semiarid intermontane basins of the North Caucasus: landscapes and land use transformation. *Arid Ecosystems*. 2021. Vol. 27. No. 4(89). pp. 32–40. (In Russ.)
12. Rastvorova V.A. 1973. Formation of the relief of mountains (on the example of Mountain Ossetia). Moscow. Nauka. 145 p. (In Russian)
13. Rosenberg G.S., Zinchenko T.D., Rosenberg A.G. Hierarchy of ecological homeostasis as a principle of systemology. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Biological Series*. 2023. No. 7. pp. 118–128. DOI: 10.31857/S1026347023600231. (In Russ.)
14. Stogny G.A., Stogny V.V. The Scythian plate southern boundary in the system of block divisibility consolidated crust of the Greater Caucasus Central and Eastern segments. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2023.96.83.001. (In Russ.)
15. Tavasiev R.A. On the origin of terraces on the slopes of intermontane basins of North Ossetia. *Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center*. 2010. Vol. 10. No. 4. pp. 36–41. (In Russ.)
16. Tebieva D.I. Landscapes of the eastern part of the Central Caucasus and their economic assessment. Vladikavkaz. North Ossetian State University. 2013. 200 p. (In Russ.)
17. Timofeeva Z.V. Concretions of the Aktoprak stratum of the Chegem River and the duration of the process of their formation. *Izvestiya Akademii Nauk USSR. Seriya Geologicheskaya*. 1960. No. 7. pp. 43–44. (In Russ.)
18. Schiffers E.V. Vegetation of the North Caucasus and its natural forage lands. Moscow. Moscow. Published by the Academy of Sciences of the USSR. 1953. 368 p. (In Russ.)
19. Prigozhin I., Stengers I. Order from chaos: A new dialogue between man and nature. Moscow. Progress. 1986. 432 p. (In Russ.)
20. Shadrin N.V. Ecosystem dynamics and evolution: Multiple stable states and rollover / no return points. Need for a new understanding. *Marine Environmental Journal*. 2012. Vol. 11. No. 2. pp. 85–95. (In Russ.)
21. Braun-Blanquet J. *Pflanzensociologie*. New York. Wien. 1964. 865 p.
22. Holling C.S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review Ecology and Systems*. 1973. Vol. 4. pp. 1–23.
23. Holling C. S., Schindler D.W., Walker B.W., Roughgarden J. Biodiversity in the functioning of ecosystems: an ecological synthesis. In: *Biodiversity Loss: Economic and Ecological Issues*. Cambridge. Cambridge University Press. 1995. pp. 44–83.
24. Kopecky K., Hejny S. A new approach to the classification of anthropogenic plant communities. *Vegetatio*. 1974. Vol. 29. pp. 17–20.
25. Scheffer M., Bascompte J., Brock W.A., Brovkin V. Early-warning signals for critical transitions. *Nature*. 2009. Vol. 461. pp. 53–59.
26. Schmitz O.J. Resolving ecosystem complexity. Princeton. Princeton University Press. 2010. 192 p.

УДК 556.18

DOI: 10.46698/VNC.2026.94.83.001

Оригинальная статья

Многолетняя динамика гидрографических характеристик и наземного покрова в речных бассейнах Азово-Кубанской равнины

А.В. Погорелов¹, Д.А. Липилин^{1, 2, 3}, М.В. Кузякина^{1, 3}

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

² Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, Россия, 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13;

³ Кубанский государственный технологический университет, Россия, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2

Статья поступила: 11.10.2025, доработана: 05.03.2026, принята к публикации: 10.03.2026

Резюме: Актуальность работы. Водные ресурсы Азово-Кубанской равнины, представленные преимущественно степными реками, – один из определяющих факторов хозяйственного развития и геоэкологической обстановки степной зоны Краснодарского края. Естественные и обусловленные техногенными причинами различия в формировании поверхностного стока и гидрографических характеристик рек остаются недостаточно исследованными. Непрерывная дигрессия речных систем в степной зоне Краснодарского края вследствие распашки, перепланировки поверхности водосборов, нарушения дренажа перегораживающими сооружениями ведет к утрате реками своего водно-ресурсного потенциала. **Цель исследования** – количественные оценки трансформации речных систем Азово-Кубанской равнины на основе гидрографических характеристик (длина водотоков, распаханность и урбанизированность водосборов и др.) за последние десятилетия (1999–2023 гг.). Основное внимание уделено бассейнам рек Понуры и Кирпили общей площадью 4,27 тыс. км² с суммарной длиной водотоков 1,98 тыс. км. **Методы исследования.** При обработке спутниковых снимков (Landsat 7/8), распознавании классов наземного покрова, расчетах гидрографических показателей и построении аналитических карт применены ГИС-технологии. Цифровое моделирование водно-эрозионной сети и водосборов разного порядка выполнено с использованием глобальной цифровой модели рельефа ASTER GDEM2. **Результаты работы.** Установлены количественные изменения водно-эрозионной сети и структуры наземного покрова (площади сельскохозяйственных полей, застройки, плавней и др.) за 1999–2023 гг. Повсеместно на водосборах низшего порядка выявлены «отмирания» верхних участков речной и балочной сети и нарушения дренированности территории. Подобная трансформация речной сети свидетельствует о неуправляемой водохозяйственной деградации рек на Азово-Кубанской равнине.

Ключевые слова: речные системы, Азово-Кубанская равнина, гидрографические характеристики, спутниковые снимки, цифровая модель рельефа, геоинформационный анализ, наземный покров, техногенная деградация.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кубанского научного фонда в рамках проекта № 24-27-20005.

Для цитирования: Погорелов А.В., Липилин Д.А., Кузякина М.В. Многолетняя динамика гидрографических характеристик и наземного покрова в речных бассейнах Азово-Кубанской равнины. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 240–253. DOI: 10.46698/VNC.2026.94.83.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.94.83.001

Original paper

Long-term dynamics of hydrographic characteristics and land cover in the river basins of the Azov-Kuban Plain

A.V. Pogorelov¹, D.A. Lipilin^{1, 2, 3}, M.V. Kuzyakina^{1, 3}

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

² Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, 13 Kalinina Str., Krasnodar 350044, Russian Federation;

³ Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya Str., Krasnodar 350040, Russian Federation

Received: 11.10.2025, revised: 05.03.2026, accepted: 10.03.2026

Abstract: Relevance. Water resources of the Azov-Kuban Plain, represented mainly by steppe rivers, are one of the determining factors of economic development and geoecological conditions of the steppe zone of Krasnodar Krai. Natural and technogenic differences in the formation of surface runoff and hydrographic characteristics of rivers remain insufficiently studied. Continuous digression of river systems in the steppe zone of Krasnodar Krai due to plowing, redevelopment of the surface of watersheds, and disruption of drainage by damming structures leads to the loss of rivers' water-resource potential. **Aim** – quantitative assessments of the transformation of the river systems of the Azov-Kuban Plain based on hydrographic characteristics (length of watercourses, ploughed and urbanized watersheds, etc.) over the past decades (1999–2023). The main attention is paid to the basins of the Ponura and Kirpili rivers with a total area of 4.27 thousand km² with a total length of watercourses of 1.98 thousand km. **Methods.** GIS technologies were used for processing satellite images (Landsat 7/8), recognizing land cover classes, calculating hydrographic indicators and creating analytical maps. Digital modeling of the water-erosion network and catchments of different orders was performed using the global digital relief model ASTER GDEM2. **Results.** Quantitative changes in the water-erosion network and the structure of the land cover (area of agricultural fields, buildings, floodplains, etc.) for 1999–2023 were established. Everywhere in the lower-order catchments, “dying off” of the upper sections of the river and ravine network and violations of the drainage of the territory were revealed. Such a transformation of the river network indicates uncontrolled water management degradation of the rivers on the Azov-Kuban Plain.

Keywords: river systems, Azov-Kuban Plain, hydrographic characteristics, satellite images, digital elevation model, geoinformation analysis, land cover, technogenic degradation.

Acknowledgments: The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 24-27-20005 and with the financial support of the Kuban Science Foundation in the framework of the scientific project No. 24-27-20005.

For citation: Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Kuzyakina M.V. Long-term dynamics of hydrographic characteristics and land cover in the river basins of the Azov-Kuban Plain. *Geologiyal Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 240-253. DOI: 10.46698/VNC.2026.94.83.001

Введение

В условиях растущего дефицита воды в степной зоне Краснодарского края особую актуальность для обеспечения хозяйственной деятельности приобретают исследования водных ресурсов степных рек. Средние и малые реки степной зоны Юга России, включая реки Азово-Кубанской равнины, на фоне их техногенной деградации перешли черту экологического кризиса [Погорелов и др., 2024]. Наблюдается неконтролируемое ухудшение речных систем под воздействием человеческой, в том числе водохозяйственной деятельности, то есть их деградация [Суздалева, Горюнова, 2014]. В течение многих десятилетий на реках Азово-Кубанской равнины отмечается уменьшение стока, снижение транспортирующей способности рек, усиление эрозионных процессов на водосборах, накопление загрязняющих веществ в воде и донных отложениях, что, в свою очередь, приводит к уменьшению глубин, эвтрофикации и ухудшению экологического состояния речных экосистем [Погорелов и др., 2023, 2024; Белюченко, 2010; Белюченко 2017; Суслов, 2015; Экология речных ..., 2023]. Мероприятия по экологическому оздоровлению рек в виде нерегулярной и весьма затратной расчистки отдельных небольших по протяженности участков русел некоторых степных рек нельзя признать эффективными.

Основные техногенные причины дигрессии речных экосистем в степной зоне Краснодарского края: разрушение естественного почвенно-растительного покрова на водосборах с формированием наземного покрова техногенного происхождения; перепланировка склонов водосборов; распашка пойм (зачастую до уреза воды) и русел; большое количество перегораживающих сооружений на реках; нарушение естественного дренажа территории, включая создание искусственной ирригационной сети; нарушение водоохраных и санитарных зон вдоль водных объектов, а также неправильное землепользование в пределах прибрежных защитных полос.

Многолетние изменения гидрографических характеристик рек Азово-Кубанской равнины, испытывающих техногенные воздействия, остаются недостаточно изученными. Кроме того, в каждом из бассейнов техногенные проявления имеют неодинаковую выраженность в гидрографических показателях (длина водотоков, распаханность и урбанизированность водосборов и др.). Отсюда, цель работы – оценка техногенных преобразований речных систем Азово-Кубанской равнины за последние десятилетия по данным гидрографических характеристик.

Настоящая статья продолжает исследования техногенной трансформации речных бассейнов в Краснодарском крае [Погорелов и др., 2023, 2024], фокусируя внимание на неисследованных бассейнах рек Понуры и Кирпили. Данные реки в настоящее время фактически представляют собой природно-техногенные системы с измененными морфометрическими и морфологическими характеристиками, высокой зарегулированностью стока и нарушенными показателями вещественного обмена.

Объект исследования

Азово-Кубанская аккумулятивная равнина занимает западную часть Предкавказской депрессии, имеет слабо наклоненную к северо-западу поверхность с преобладающими абсолютными высотами 20–150 м. Равнина сложена легко размываемыми лессовидными суглинками и глинами, вблизи побережья – дельтовыми отложениями. Поверхность ее слабо расчленена, речные долины неглубокие, водоразделы морфологически не выражены. Долины рек, не разработанные в верховьях, как правило, расширяются в среднем течении и достигают максимальной ширины в низовьях. В западной части равнины уровень рек располагается почти вровень с местностью; на дельтовых участках повсеместно развиты плавни.

Анализируемые бассейны рек Кирпили и Понуры занимают южную часть Азово-Кубанской равнины (рис. 1), входя отчасти в административные границы города Краснодара. Перегораживающие сооружения (плотины) разбивают реки на цепь прудов, каковых по нашим данным в русле Кирпили насчитывается 71, в русле Понуры – 34. Ширина русел, а фактически прудов, на некоторых участках достигает 300 м и более. В межень пруды могут чередоваться с участками пересыхающих русел, превращаясь в последовательность изолированных водоёмов.

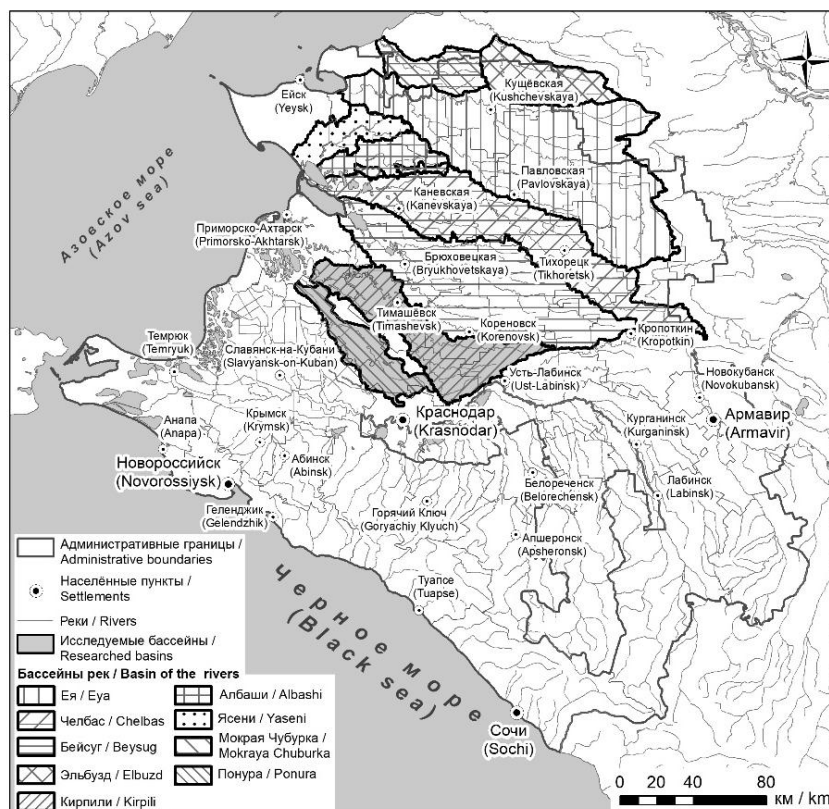


Рис. 1. Расположение исследуемых речных бассейнов на территории Краснодарского края /

Fig. 1. Location of the studied river basins in the Krasnodar territory

Исследуемая территория находится в зоне семиаридного климата. Главный источник питания Понуры и Кирпили – атмосферные осадки с максимумом (200–300 мм) в теплое время года. Летом участие атмосферных осадков в формировании речного стока заметно снижается из-за высоких потерь на испарение, преобладает питание грунтовыми водами с повышенной минерализацией. Зимой снежный покров характеризуется неустойчивостью и малой продолжительностью залегания. Скорость течения на реках невысокая – не более 0,1 м/с [Лурье, Панов, 2021]. Режиму исследуемых рек свойственно весеннее половодье, однако естественный сток нарушен плотинами, большинство из которых не имеет водопропускных устройств. Подъёмы уровня во время половодья незначительны, что, тем не менее, приводит к затоплению многих плотин. Минимальные уровни наблюдаются в конце лета – начале осени. В целом годовому ходу уровней воды на реках свойственна устойчивость – половодье и паводки сглажены.

Техногенные воздействия в виде агротехнической деятельности на водосборах, влияние гидротехнических сооружений и инженерных мероприятий на русловые процессы имеют в совокупности неуправляемый характер. Интегративный вклад техногенных преобразований в формирование речного стока и водного баланса ис-

следуемой территории не определён. Основные причины – недостаточная изученность техногенных преобразований и их гидрологических эффектов, неразвитая гидрометеорологическая сеть.

Методы исследования

В соответствии с ландшафтно-гидрологическим подходом [Косолапов и др., 1995; Позаченюк и др., 2022] существует тесная взаимосвязь между ландшафтной структурой водосбора и характеристиками стока рек, стекающих с этого водосбора. Оценка изменений гидрографических (морфометрических и морфологических) характеристик выполняется в настоящей работе с использованием данных дистанционного зондирования – спутниковых снимков и цифровых моделей рельефа.

Среди гидрографических характеристик степных рек существенными в аспекте преобразований речных водосборов являются их распаханность и урбанизированность. Упомянутые характеристики опосредуются классами наземного покрова. Наземный покров (landcover) – термин, относящийся к физическому покрову земной поверхности и включающий в себя разные типы земельных участков и их характеристики (леса, пастбища, горы, города, сельскохозяйственные угодья, водные объекты и т.д.) [Bartholome et al., 2002; Савин, Березуцкая, 2024]. Согласно [Yang, Xin, 2021], наземный покров – это биофизическая оболочка, наблюдаемая на земной поверхности, которая включает в себя как природные объекты, так и антропогенные. Разные классы наземного покрова идентифицируются по данным спутниковых снимков.

В расчетах характеристик речных систем авторы опирались на приемы гидрографии, при построении карт и проведении пространственных расчетов – на инструменты ГИС-картографирования и опыт пространственного анализа гидрографических характеристик [Погорелов и др., 2023, 2024; Sangle, Yannawar, 2014; Daramola et al., 2022; Dwivedi et al., 2022; Kumar et al., 2021; Nikolova et al., 2022; Sondarva et al., 2023; Chhetri, 2023].

Векторизация сети тальвегов (постоянных и временных водотоков) и границ речных бассейнов проводилась в среде ГИС по откорректированной глобальной цифровой модели рельефа ASTER GDEM2 с пространственным разрешением 30 м. Верификация и корректировка положения оцифрованных водотоков, а также результатов дешифрирования классов наземного покрова осуществлялись с помощью сервиса Google Earth Pro. Расхождение оценок площади речных бассейнов и длин рек в справочных и литературных источниках объясняется неопределенностью положения линий водоразделов вкупе с различиями в определении конечных створов устьев рек (впадение в море или в лиман).

Для идентификации классов наземного покрова в бассейнах рек Кирпили и Понуры за период 1999–2023 гг. использованы космические снимки Landsat 7/8, пространственное разрешение которых сопоставимо с разрешением ЦМР ASTER GDEM2. Для соблюдения корректности сравнения разновременных снимков даты съемки выбраны на периоды времени, приходящиеся на фазу межени в исследуемых реках.

При дешифрировании космических снимков, следуя методике [Погорелов и др., 2023, 2024], за основу классификации принята номенклатура наземного покрова, разработанная для европейской программы CORINE LandCover (CLC). Легенда карт CLC состоит из 44 типов земной поверхности. Для исследуемой территории нами на снимках Landsat 7/8 выделено четыре класса наземного покрова: 1) сельскохозяйственные угодья (Agricultural areas), 2) населенные пункты и объекты инфраструктуры (Artificial surfaces), 3) плавни (болота) и древесная растительность (Wetland, Forest sandsemi-natural areas), 4) водные объекты (Water body). Объединение плавней

и древесной растительности в единый класс обусловлено сложностью их идентификации на космических снимках как отдельных классов наземной поверхности в условиях исследуемых речных бассейнов.

Результаты работы и их обсуждение

Длина водотоков выступает информативным показателем среди гидрографических характеристик в аспекте многолетней деградации речной сети. В процессе векторизации границ бассейнов низших порядков внутри бассейнов рек Понуры (площадь 1353,1 км²) и Кирпили (2920,8 км²) выделено 26 частных водосборов: 18 – в бассейне Кирпили и 8 – в бассейне Понуры с общей вариацией площадей водосборов 23... 617 км². Анализ трансформации водно-эрозионной сети в исследуемых бассейнах показал, что за 1999–2023 гг. произошло уменьшение протяженности водотоков в каждом из выделенных частных водосборов – от 5,3 до 31,2 %. В результате в бассейне р. Кирпили суммарная длина водотоков за 24 года сократилась с 1821,7 до 1427 км, то есть на 394,7 км (или на 21,5 %), в бассейне р. Понуры с 613 до 550,5 км – на 62,5 км (10,2 %).

Карта (рис. 2) отражает изменения длины водотоков в бассейнах рек Понуры и Кирпили в сравнении с другими речными бассейнами Азово-Кубанской равнины. Установлено, что ползучая экспансия пахотных земель приводит к уничтожению верхних звеньев водно-эрозионной сети, предопределяя, в свою очередь, последующее нарушение активности флювиальных процессов и дренированности территории. В целом это свидетельствует о деградации речной сети на Азово-Кубанской равнине. Отметим, что величины сокращения водно-эрозионной сети в частных водосборах в бассейнах Кирпили и Понуры вполне сопоставимы с соответствующими показателями, ранее полученными нами для частных водосборов рек Ея, Албаши, Челбас, Бейсуг и др. [Погорелов и др., 2023, 2024].

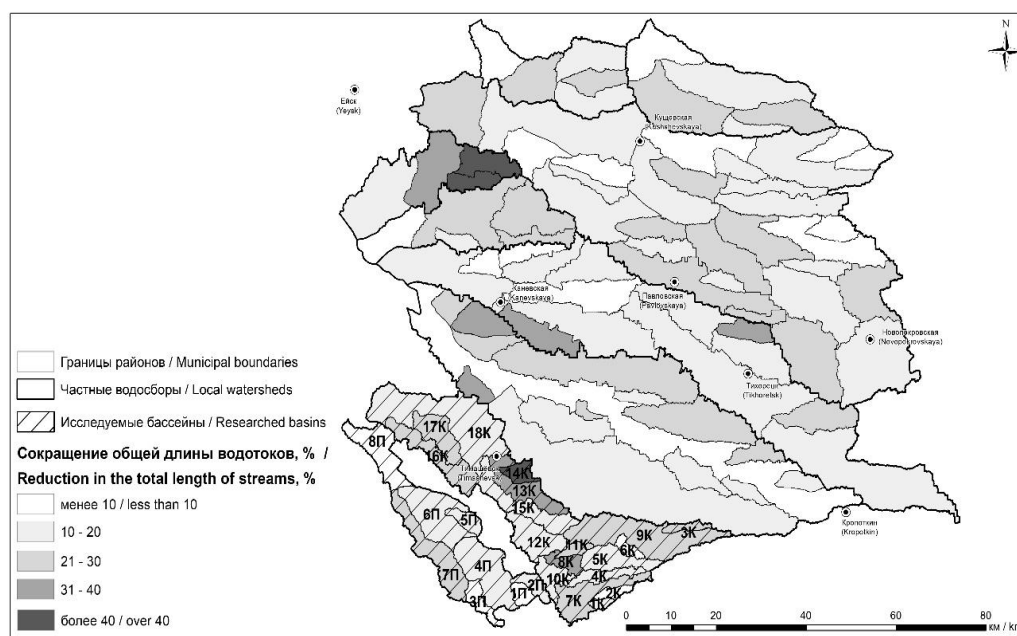


Рис. 2. Сокращение общей длины водотоков за период 1999–2023 гг. в бассейнах низших порядков /
Fig. 2. Reduction in the total length of watercourses for the period 1999–2023 in lower-order basins

Рассмотрим изменения в структуре наземного покрова. В Краснодарском крае за 2018–2023 гг. произошло незначительное сокращение площади пашни (на 0,1 %) при

устойчивом увеличении площадей населенных пунктов (на 2,3 %) [Барсукова и др., 2025]. Подобные изменения вполне закономерны для последних десятилетий. Понятно, что внутри региона эта динамика, вызванная местными трендами землепользования, неоднородна. Сведения о распределении классов наземного покрова в речных бассейнах Кирпили и Понуры, рассматриваемые с позиции гидрографических характеристик (распаханность, урбанизированность), приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 / Table 1

**Распределение классов наземного покрова в бассейнах рек Кирпили и Понуры /
Distribution of land cover classes in the Kirpili and Ponura river basins**

№	Бассейн / Basin	Площадь, км ² / Area, km ²	Количество частных бассейнов / Amount of local basins	1999 г. / 1999 year				2023 г. / 2023 year			
				Населенные пункты, % / Settlements, %	Плавни и лесополосы, % / Swamps and forest belts, %	Водные объекты, % / Water objects, %	Сельскохозяйственные поля, % / Agricultural fields, %	Населенные пункты, % / Settlements, %	Плавни и лесополосы, % / Swamps and forest belts, %	Водные объекты, % / Water objects, %	Сельскохозяйственные поля, % / Agricultural fields, %
1	Кирпили / Kirpili	2920,72	18	17,65	7,20	3,35	71,80	10,39	7,65	2,65	79,31
2	Понура / Ponura	1353,08	8	16,55	8,10	1,35	74,00	15,30	10,21	2,02	72,47

Подавляющая часть площади анализируемых бассейнов занята сельскохозяйственными полями (72,5–79,3 % по данным 2023 г.) (табл. 1). Однако многолетние изменения площади полей в бассейнах, как выяснилось, разнонаправленные. Так, в бассейне р. Понуры в 1999–2023 гг. наблюдалось уменьшение площади сельскохозяйственных полей с 74 до 72,5 % при увеличении площади плавней; в бассейне р. Кирпили зафиксирован заметный рост площади полей – с 71,8 до 79,3 %. На фоне роста площади пашни сокращение длины водотоков в бассейне р. Кирпили вполне объяснимо.

На уровне частных водосборов дифференциация наземного покрова характеризуется их значимым разбросом (табл. 2) и определенными многолетними изменениями. Так, относительная площадь, занятая в частных водосборах населенными пунктами и объектами инфраструктуры и отражающая урбанизированность, изменяется в 2023 г. от 2,4 % (балка Сухая) до 19,9 % (нижнее течение Понуры). А относительная площадь сельскохозяйственных полей, характеризующая распаханность частных водосборов, варьирует по данным 2023 г. от 63,1 % (среднее течение Кирпили) до 92 % (балка Сухая).

Характерные изменения за 1999–2023 гг. в структуре наземного покрова речных бассейнов, вызванные хозяйственной деятельностью, показаны на фрагментах обработанных спутниковых снимков (рис. 3, 4). Несмотря на сложившуюся в целом структуру землепользования, соотношение классов наземного покрова в водосборах продолжает меняться, что нашло свое отражение в результатах дешифрирования (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Распределение наземного покрова в частных водосборах в бассейнах рек
Кирпили и Понуры / Distribution of land cover in individual catchments
in the Kirpili and Ponura river basins**

№	Бассейн / Basin	Площадь, км² / Area, km²	1999 г. / 1999 year				2023 г. / 2023 year			
			Населенные пункты, % / Settlements, %	Плавни и лесополосы, % / Swamps and forest belts, %	Водные объекты, % / Waterobjects, %	Сельскохозяйственные поля, % / Agriculturalfields, %	Населенные пункты, % / Settlements, %	Плавни и лесополосы, % / Swamps and forest belts, %	Водные объекты, % / Waterobjects, %	Сельскохозяйственные поля, % / Agriculturalfields, %
Бассейн р. Кирпили / Kirpili River basin										
1К	Балка Сухая / Sukhaya valley	23,32	1,32	6,67	0,04	91,97	2,45	8,38	0,04	89,13
2К	Балка Первая / Pervaya valley	40,54	9,90	8,75	1,10	80,25	9,74	7,45	1,08	81,74
3К	Пшик / Pshik	41,97	14,94	5,51	0,90	78,65	4,96	5,78	0,42	88,84
4К	2-я Кочеты (верхнее течение) / 2-ya Kochety (upperflow)	92,18	10,25	5,48	1,62	82,65	5,83	6,37	1,41	86,39
5К	3-я Кочеты (верхнее течение) / 3-ya Kochety (upperflow)	158,79	13,98	4,82	1,33	79,87	3,23	4,71	0,93	91,12
6К	Раздольная / Razdolnaya	39,68	19,18	5,13	0,43	75,25	3,67	2,67	0,35	93,32
7К	1-я Кочеты / 1-ya Kochety	212,7564	11,34	8,31	1,98	78,37	9,60	7,27	1,81	81,33
8К	3-я Кочеты (нижнее течение) / 3-ya Kochety (downflow)	64,02	22,41	9,04	1,96	66,59	14,93	8,72	3,12	73,23
9К	Кирпили (верхнее течение) / Kirpili (upperflow)	464,73	20,21	6,72	1,55	71,52	10,99	4,64	1,17	83,19
10К	2-я Кочеты (нижнее течение) / 2-ya Kochety (downflow)	91,79	20,77	7,00	0,80	71,44	17,54	11,10	1,90	69,46
11К	Ставок / Stavok	39,87	14,41	11,80	3,74	70,05	4,93	4,53	2,81	87,74
12К	Кочеты / Kochety	190,34	16,21	9,61	2,02	72,16	6,96	9,12	2,55	81,37

№	Бассейн / Basin	Площадь, км ² / Area, km ²	1999 г. / 1999 year				2023 г. / 2023 year			
			Населенные пункты, % / Settlements, %	Плавни и лесополосы, % / Swamps and forest belts, %	Водные объекты, % / Waterobjects, %	Сельскохозяйственные поля, % / Agriculturalfields, %	Населенные пункты, % / Settlements, %	Плавни и лесополосы, % / Swamps and forest belts, %	Водные объекты, % / Waterobjects, %	Сельскохозяйственные поля, % / Agriculturalfields, %
13К	Кирпильцы / Kirpiltsy	180,32	27,17	7,34	1,60	63,89	12,90	7,41	1,61	78,08
14К	Очеретоватая / Ocheretovataya	65,71	23,46	8,40	1,10	67,05	3,09	9,46	0,65	86,80
15К	Кирпили (среднее течение) / Kirpili (middleflow)	226,39	25,75	7,49	3,63	63,13	10,79	8,09	4,97	76,15
16К	Гречаная балка / Grechanaya balka	211,08	15,74	8,79	3,85	71,62	9,41	10,69	2,33	77,57
17К	Балка Таранцева / Tarantseva valley	159,32	10,96	6,10	3,24	79,71	6,81	5,04	2,77	85,39
18К	Кирпили (нижнее течение) / Kirpili (downflow)	617,91	16,85	6,50	8,00	68,65	14,91	9,88	5,01	70,20
Бассейн р. Понуры / Ponura River basin										
1П	1-я Понура / 1-уа Ponura	46,66	10,67	5,47	1,65	82,21	11,53	13,12	3,01	72,34
2П	2-я Понура / 2-уа Ponura	64,58	8,94	4,94	0,53	85,59	6,23	7,29	0,67	85,81
3П	Осечки / Osechki	74,28	16,08	8,72	0,26	74,94	18,19	13,80	0,23	67,78
4П	Понура (верхнее течение) / Ponura (upperflow)	315,24	19,25	8,70	1,02	71,03	15,76	9,53	1,38	73,34
5П	Балка Безымянная / Bezumyannaya valley	62,66	14,43	5,57	2,11	77,89	14,33	6,57	1,31	77,78
6П	Понура (нижнее течение) / Ponura (downflow)	299,18	21,09	9,49	1,73	67,69	19,88	8,49	3,32	68,30
7П	Балка Косатая / Kosataya valley	265,77	14,60	9,62	2,40	73,38	8,32	16,23	1,18	74,27
8П	Понурский канал / Ponurskiy channel	224,71	13,21	5,55	0,37	80,87	19,53	6,37	3,16	70,93

Отметим безусловное доминирование агрофитоценозов (пашни) в ландшафтообразовании при подчиненной роли земель, занятых застройкой и водными объектами на частных водосборах (табл. 2, рис. 3, 4), что характеризует территориальные особенности землепользования на Азово-Кубанской равнине. Полученные данные закладывают основу для последующих оценок вклада техногенных преобразований поверхности водосборов в водный баланс территории.

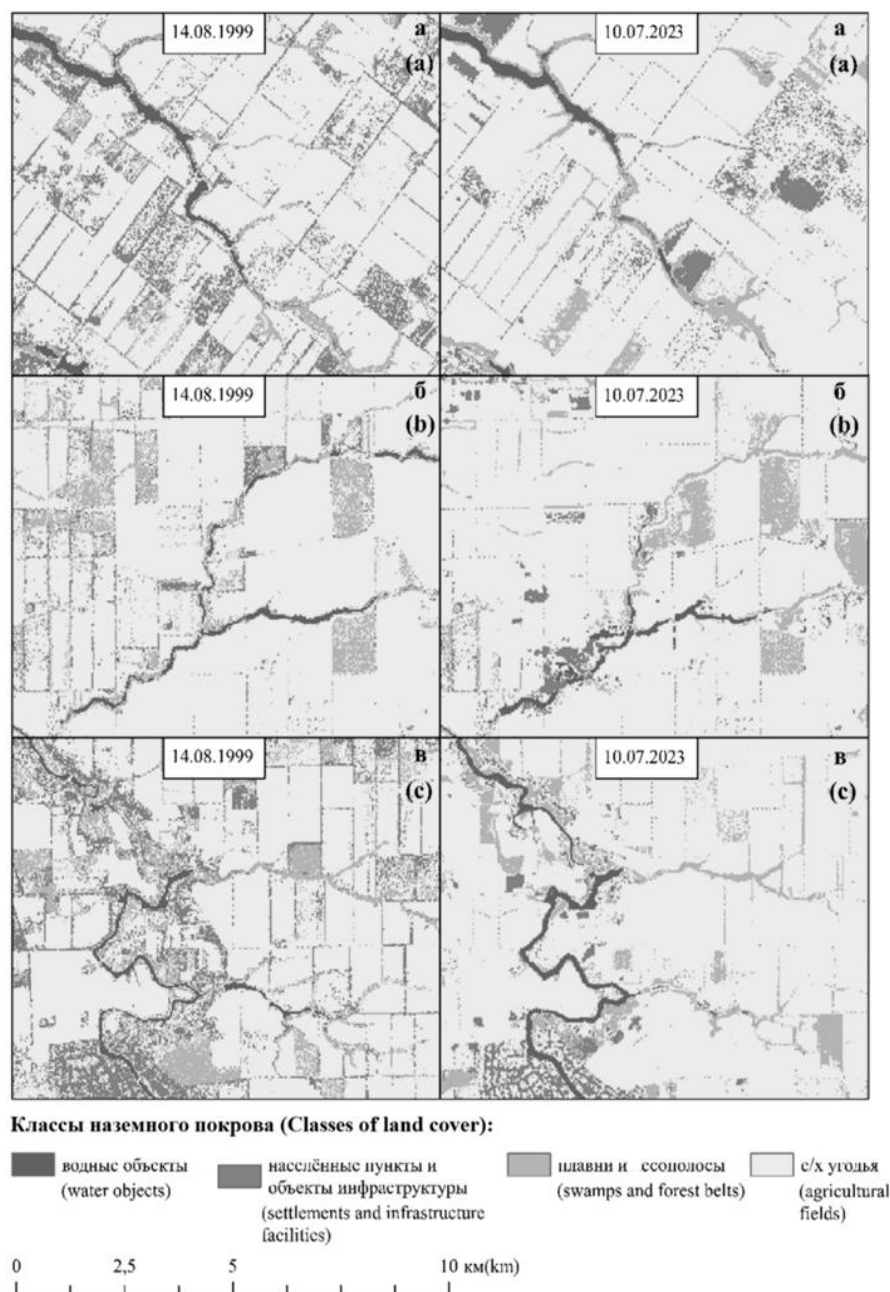


Рис. 3. Распознавание классов наземного покрова в бассейне р. Кирпили на снимках спутников Landsat. Характерные примеры изменений поверхности за 1999–2023 гг. в окрестностях пос. Рогачевский (а), с. Первореченское (б) и ст. Старомышастовская (в) /

Fig. 3. Recognition of land coverclasses in the Kirpili River basin on Landsat satellite images. Typical examples of surface changes for 1999–2023 in the vicinity of Rogachevsky (a), Pervorechenskoye (b), and Staromyshastovskaya (c)

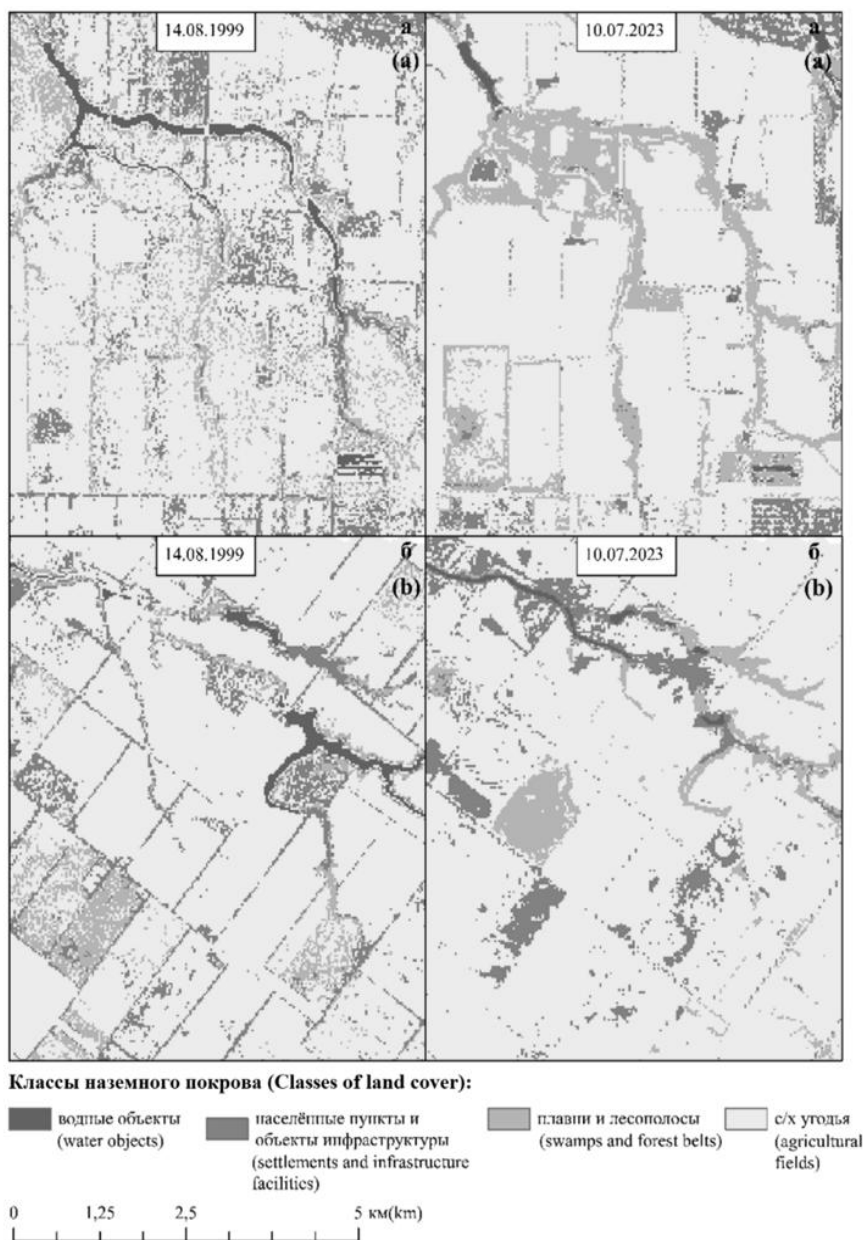


Рис. 4. Распознавание классов наземного покрова в бассейне р. Понуры на снимках спутников Landsat. Характерные примеры изменений поверхности за 1999–2023 гг. в окрестностях ст. Новотитаровская (а) и ст. Старовеличковская (б)/

Fig. 4. Recognition of land cover classes in the Ponura River basin on Landsat satellite images. Typical examples of surface changes for 1999–2023 in the vicinity of Novotitarovskaya (a) and Starovelichkovskaya (b)

Выводы

1. Структура землепользования в степной зоне Краснодарского края подвергается многолетним изменениям. Наблюдаемые за последние десятилетия в Краснодарском крае сокращение сельскохозяйственных угодий и рост площади населенных пунктов проявляются внутри региона дифференцированно с учетом местной специфики, прежде всего – многолетней динамики распаханности и урбанизированности на отдельных водосборах.

2. С использованием гидрографических показателей (длина водотоков, распаханность, урбанизированность) выполнены оценки трансформации речных систем Понуры и Кирпили и наземного покрова в бассейнах рек. В обоих бассейнах площади, занятые сельскохозяйственными полями, доминируют (72,5–79,3 % общей площади). Однако за 1999–2023 гг. изменения площади сельскохозяйственных угодий оказались разнонаправленными: в бассейне р. Кирпили отмечен рост на 7,5 %, в бассейне Понуры – сокращение на 1,5 %.

3. В бассейнах рек Кирпили и Понуры (как и в бассейнах рек Эльбурз, Ея, Ясени, Албаши, Челбас, Бейсуг на Юге России) происходит уменьшение длины водно-эрозионной сети – в среднем ежегодно за 1999–2023 гг. на 0,5...0,9 % вследствие уничтожения в процессе распашки верховий рек. Наряду с зарегулированностью стока многочисленными плотинами, это свидетельствует о неконтролируемой дигрессии речных систем Азово-Кубанской равнины.

При сохранении установленных трендов трансформации речных систем процессы их дигрессии в перспективе будут несомненно обостряться.

Литература

1. Барсукова Г.Н., Барвинко О.А., Калугин А.О. Динамика земельного фонда Российской Федерации и Краснодарского края по категориям земель, составу и площади сельскохозяйственных угодий. // Московский экономический журнал. – 2025. – Т. 10. № 2. – С. 48–65. DOI: 10.55186/2413046X_2025_10_2_37.
2. Белюченко И.С. Функционирование степных рек Краснодарского края и перспективы их развития. // Экология речных ландшафтов: сб. статей по материалам I Межд. экол. конф. / Отв. за вып. Н.Н. Мамась. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – С. 28–43.
3. Белюченко И.С. Экологическое состояние бассейнов степных рек Кубани и перспективы их развития. // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2010. – Т. 6. № 2. – С. 5–12.
4. Косолапов А.Е., Кувалкин А.В., Мордвинцев М.М., Магомедзагиров З.М. Ландшафтно-гидрологический подход к обоснованию сети мониторинга и управления малым водосбором. // Мелиорация и водное хозяйство. – 1995. – № 6. – С. 25–26.
5. Лурье П.М., Панов В.Д. Реки бассейна Азовского моря: Гидрография и режим стока. Ростов-на-Дону: Донской издательский дом, 2021. – 672 с.
6. Погорелов А.В., Липилин Д.А., Кузякина М.В. О техногенной деградации речных систем в Восточном Приазовье: гидрографический аспект. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 3. – С. 243–259. DOI: 10.46698/i4469-5379-6925-p.
7. Погорелов А.В., Липилин Д.А., Яроцкая Е.В. Геоинформационный анализ современных изменений гидрографических характеристик речной сети на Азово-Кубанской равнине (бассейн реки Ея). // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 161–179. DOI: 10.46698/VNC.2023.35.64.001.
8. Позаченюк Е.А., Тимченко З.В., Кутикова Е.В. Ландшафтно-гидрологический подход к изучению речных ландшафтов Алуштинского амфитеатра. // Учёные записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2022. – Т. 8(74). № 1. – С. 70–82.
9. Савин И.Ю., Березуцкая Э.Р. Концепция наземного покрова (LandCover) как основа дистанционного мониторинга земель. // Региональные геосистемы. – 2024. – Т. 48. № 1. – С. 77–90. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-1-77-90.
10. Суздалева А.Л., Горюнова С.В. Техногенез и деградация поверхностных водных объектов. М.: ООО ИД ЭНЕРГИЯ, 2014. – 456 с.
11. Суслов О.Н. Степные реки Краснодарского края. Краснодар: КубГАУ, 2015. – 256 с.
12. Экология речных ландшафтов: сб. ст. по материалам VII Межд. науч. экол. конф. / Отв. за вып. Н.Н. Мамась. – Краснодар: КубГАУ, 2023. – 247 с.
13. Bartholome E., Belward A., Frederic A., Bartalev S., Carmona-Moreno C., Eva H., Fritz S., Grégoire J.M., Mayaux P., Stibig H.J.E.E. GLC 2000: Global land cover mapping for the year 2000: project status november 2002. Italy, Institute for Environment and Sustainability. – 2002. – 66 p.

14. Chhetri B.A. Quantitative analysis of morphometric parameters using remote sensing and GIS techniques in the Geil River Basin of Darjeeling Himalaya. // *Ecology, Environment and Conservation*. – 2023. – Vol. 29. No. 04. – pp. 1940–1948. DOI: 10.53550/eec.2023.v29i04.082.
15. Daramola J., Lam K.C., Ekhwan T.M., Mokhtar J., Salihu Y.M., Babayahaya A.M. Assessment of landuse/landcover dynamics of Kaduna watershed, using remote sensing data and GIS techniques. // *Malaysian Journal of Society and Space*. – 2022. – Vol. 18. No. 2. – pp. 32–47. DOI: 10.17576/geo-2022-1802-03.
16. Dwivedi L., Pandey R., Tripathi Sh. Remote sensing and GIS based morphometric characterization of Bichiya river watershed of Rewa district, MP. // *International Journal of Applied Research*. – 2022. – Vol. 8. No. 6. – pp. 101–107. DOI: 10.22271/allresearch.2022.v8.i6b.9829.
17. Kumar V., Sen S., Chauhan P. Geo-morphometric prioritization of Aglar micro watershed in Lesser Himalaya using GIS approach. // *Modeling Earth Systems and Environment*. – 2021. – Vol. 7. No. 2. – pp. 1269–1279. DOI: 10.1007/s40808-020-01000-8.
18. Nikolova V., Mitova M., Dimitrov E. Topographic factor of water erosion – analysis of watershed morphometry and RUSLE LS factor in GIS environment. // *Review of the Bulgarian Geological Society*. – 2022. – Vol. 83. No. 1. – pp. 3–14. DOI: 10.52215/rev.bgs.2022.83.1.3.
19. Sangle A.S., Yannawar P.L. Morphometric analysis of watershed using GIS and RS: a review. // *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*. – 2014. – Vol. 3. Issue 11. – pp. 599–602.
20. Sondarva K.N., Shrivastava P.K., Jayswal P.S. Basic morphometric analysis of watershed or River basin using GIS: a review. // *Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences*. – 2023. – Vol. 25. No. 03. – pp. 474–478. DOI: 10.53550/ajmbes.2023.v25i03.013.
21. Yang J., Xin H. The 30m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. // *Earth System Science Data*. – 2021. – Vol. 13(8) – pp. 3907–3925. DOI: 10.5194/essd-13-3907-2021.

References

1. Barsukova G.N., Barvinko O.A., Kalugin A.O. Dynamics of the land fund of the Russian Federation and Krasnodar Krai by land categories, composition and area of agricultural land. *Moscow Economic Journal*. 2025. Vol. 10. No 2. pp. 48–65. DOI: 10.55186/2413046X_2025_10_2_37. (In Russ.)
2. Belyuchenko I.S. Functioning of the steppe rivers of the Krasnodar territory and prospects for their development. In: *Ecology of river landscapes: coll. articles on materials I Int. ecol. conf. Rep. for issue N.N. Mamas*. Krasnodar. KubSAU. 2017 pp. 28–43. (In Russ.)
3. Belyuchenko I.S. Ecological state of the basins of the steppe rivers of the Kuban and prospects for their development. *Ecological Bulletin of the North Caucasus*. 2010. Vol. 6. No. 2. pp. 5–12. (In Russ.)
4. Kosolapov A.E., Kuvalkin A.V., Mordvintsev M.M., Magomedzagirov Z.M. Landscape-hydrological approach to substantiating a network for monitoring and managing a small watershed. *Melioration and Water Management*. 1995. No. 6. pp. 25–26. (In Russ.)
5. Lurie P.M., Panov V.D. Rivers of the Azov Sea basin: Hydrography and runoff regime. Rostov-on-Don. Donskoy publishing house. 2021. 672 p. (In Russ.)
6. Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Kuzyakina M.V. On technogenic degradation of river systems in the Eastern Azov region: hydrographic aspect. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 243–259. DOI: 10.46698/i4469-5379-6925-p. (In Russ.)
7. Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Yarotskaya E.V. GIS analysis of modern changes in the hydrographic characteristics of the river network on the Azo-Kuban plain (Eya river basin). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 161–179. DOI: 10.46698/VNC.2023.35.64.001. (In Russ.)
8. Pozachenyuk E.A., Timchenko Z.V., Kutikova E.V. Landscape-hydrological approach to the study of river landscapes of the Alushta amphitheater. *Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Geography. Geology*. 2022. Vol. 8(74). No. 1. pp. 70–82. (In Russ.)
9. Savin I.Yu., Berezutskaya E.R. The concept of land cover as a basis for remotesensing monitoring of land. *Regional geosystems*. 2024. Vol. 48. No. 1. pp. 77–90. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-1-77-90. (In Russ.)

10. Suzdaleva A.L., Goryunova S.V. Technogenesis and degradation of surface water bodies. Moscow. LLC ID ENERGY. 2014. 456 p. (In Russ.)
11. Suslov O.N. Steppe rivers of the Krasnodar Territory. Krasnodar. KubSAU. 2015. 256 p. (In Russ.)
12. Ecology of river landscapes. In: coll. articles on materials VII Int. ecol. conf. Rep. for issue N.N. Mamas. Krasnodar. KubSAU. 2023. 247 p. (In Russ.)
13. Bartholome E., Belward A., Frederic A., Bartalev S., Carmona-Moreno C., Eva H., Fritz S., Grégoire J.M., Mayaux P., Stibig H.J.E.E. GLC 2000: Global land cover mapping for the year 2000: project status November 2002. Italy, Institute for Environment and Sustainability. – 2002. – 66 p.
14. Chhetri B.A. Quantitative analysis of morphometric parameters using remote sensing and GIS techniques in the Geil River Basin of Darjeeling Himalaya. Ecology, Environment and Conservation. 2023. Vol. 29. No. 04. pp. 1940–1948. DOI: 10.53550/eec.2023.v29i04.082.
15. Daramola J., Lam K.C., Ekhwan T.M., Mokhtar J., Salihu Y.M., Babayahaya A.M. Assessment of landuse/landcover dynamics of Kaduna watershed, using remote sensing data and GIS techniques. Malaysian Journal of Society and Space. 2022. Vol. 18. No. 2. pp. 32–47. DOI: 10.17576/geo-2022-1802-03.
16. Dwivedi L., Pandey R., Tripathi Sh. Remote sensing and GIS based morphometric characterization of Bichiya river watershed of Rewa district, MP. International Journal of Applied Research. 2022. Vol. 8. No. 6. pp. 101–107. DOI: 10.22271/allresearch.2022.v8.i6b.9829.
17. Kumar V., Sen S., Chauhan P. Geo-morphometric prioritization of Aglar micro watershed in Lesser Himalaya using GIS approach. Modeling Earth Systems and Environment. 2021. Vol. 7. No. 2. pp. 1269–1279. DOI: 10.1007/s40808-020-01000-8.
18. Nikolova V., Mitova M., Dimitrov E. Topographic factor of water erosion – analysis of watershed morphometry and RUSLE LS factor in GIS environment. Review of the Bulgarian Geological Society. 2022. Vol. 83. No. 1. pp. 3–14. DOI: 10.52215/rev.bgs.2022.83.1.3.
19. Sangle A.S., Yannawar P.L. Morphometric analysis of watershed using GIS and RS: a review. International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT). 2014. Vol. 3. Issue 11. pp. 599–602.
20. Sondarva K.N., Shrivastava P.K., Jayswal P.S. Basic morphometric analysis of watershed or River basin using GIS: a review. Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences. 2023. Vol. 25. No. 03. pp. 474–478. DOI: 10.53550/ajmbes.2023.v25i03.013.
21. Yang J., Xin H. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. Earth System Science Data. 2021. Vol. 13(8) pp. 3907–3925. DOI: 10.5194/essd-13-3907-2021.

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 $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, $\cos$, $\sin$, $\min$, $\max$ и т.п. набираются прямым шрифтом. Символ не должен сливаться с надсимвольным элементом в химических эле-

ментах (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 (нуль) должны различаться по начертанию. Между цифровым значением величины и ее размерностью следует ставить знак неразрывного пробела. Переносы в словах либо не употреблять. Не использовать в тексте для форматирования знаки пробела. Формулы создаются с помощью встроенного редактора формул Microsoft Equation с нумерацией в круглых скобках – (2), выравниваются по правому краю, расшифровка всех обозначений (букв) в формулах дается в порядке упоминания в формуле. Во избежание недоразумений и ошибок редакция рекомендует авторам использовать в формулах буквы латинского, греческого и других (не русских) алфавитов; при наборе формул необходимо соблюдать размеры по умолчанию. Большие формулы необходимо разбивать на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при использовании формульного редактора каждая строка – отдельный объект). Нумерацию и по возможности знаки препинания следует ставить отдельно от формул обычным текстом. Таблицы, рисунки, фотографии размещаются внутри текста и имеют сквозную нумерацию по статье 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 ВНЦ РАН, Редакция журнала «Геология и геофизика Юга России». Тел: 8 (8672) 76-19-28; факс: 8 (8672) 76-40-56, e-mail: southgeo@mail.ru

INFORMATION FOR AUTHORS

The journal «Geology and Geophysics of Russian South» publishes original articles of theoretical and methodological nature on geology, geophysics and geochemistry, the results of studying the composition and structure of the Earth's crust and mantle, the formation processes and the general patterns of mineral resources, geophysical methods for their detection. The subject of the journal corresponds to the current nomenclature areas of knowledge of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation: 1.6.1 General and regional geology. Geotectonics and geodynamics; 1.6.4 Mineralogy, crystallography. Geochemistry, geochemical methods of prospecting for minerals; 1.6.6 Hydrogeology; 1.6.9 Geophysics; 1.6.10 Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny; 1.6.11 Geology, prospecting, exploration and exploitation of oil and gas fields; 1.6.12 Physical geography and biogeography, soil geography and landscape geochemistry; 1.6.20 Geoinformatics, cartography; 1.6.21 Geoecology; 2.8.6 Geomechanics, rock destruction, mine aerogas dynamics and mining thermal physics; 2.8.8 Geotechnology, mining machines and related scientific directions.

For works of a regional nature, preference is given to articles that reveal the various issues of the geological structure of the South of Russia and adjacent territories.

According to the gradation of Sciences accepted in the international citation systems Scopus and Web of Science articles for publication in the journal «Geology and Geophysics of the South of Russia» are accepted by the following branches and groups of Sciences:

1. Earth and Planetary Sciences;
2. Environmental Science.

The journal «Geology and Geophysics of Russian South» publishes:

- articles interpreting the new scientific research results of volume not more than 10 typewritten pages including illustrations and tables;
- brief messages containing information on the important results of the preliminary research of volume 3-5 pages (these materials can be used in the full article text);
- reviews of the typewritten articles on the actual problems on current geological, geophysical and environmental problems of the South of Russia and adjacent territories, volume 20-25 pages by the editor's order.

All papers must correspond to the journal theme. The presented manuscripts pass the preliminary and total reading stages and if necessary are sent back to the authors for the correction and finishing. The manuscripts are published in Russian and in English, the abstracts in Russian and in English as well. The journal publishes only the original articles. The author is fully responsible for the requirement. The manuscripts are not returned to the authors in case of being rejected in publication. The editor also does not return the materials sent. The editor has a right to make reductions and corrections of the article text. All corrections in the text and figures can be done by the authors only at the stage of the typesetting preparations. The infringement of the manuscript submission guidelines will lead to the article rejection. The publication is free of charge for authors of papers written by request of the publisher, and for graduate students. Reprinting is allowed only with the editorship permission with the obligatory references to the journal «Geology and Geophysics of Russian South».

Instructions for the authors

Acceptance of materials for consideration is carried out through the electronic service <https://www.geosouth.ru> or by mail to the Publisher address: 93a, Markova Street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal «Geology and Geophysics of Russian South».

The following materials should be presented:

- an article (structure and rules see below),

- a separate sheet with the information about the authors: surname, name, patronymic name, scientific degree, rank, a name of the organization, office and home address and telephone number, e-mail (if exists) and the reference to the author to contact with;
- a confirmation from the organization if the presented materials are the result of the work carried out in that organization; the journal heading (section) should be pointed out in the confirmation;
- an expert conclusion or any other document allowing the publication in the open press confirmed by the organization head and proved with the stamped seal; the expert conclusion is presented only by the authors from Russia.

If materials are submitted by electronic service, paper copies of the manuscript are not required to be submitted to the editorial office. When registering online, you must follow the step-by-step instructions for uploading files. When sending materials by regular mail, you must attach two paper copies of the article, signed by all authors. Text prepared in accordance with the general technical requirements is printed on one side of an A4 sheet. An annotation with the title, authors and their affiliation given at the beginning is printed on a separate sheet. Signatures to the figures are also provided separately. Each table and figure should be printed on a separate sheet. At the bottom of the page with an illustration, you must specify the number of the picture. It is also necessary to attach an electronic version on any portable storage device or, in agreement with the editors, send the relevant materials by e-mail.

The article lay-out rules (submission guidelines)

The following information should be pointed out on the first page: universal decimal classification, the article heading (title) in Russian (Sentence Case, without quotation marks, without division of a word, without a full stop at the end, underlining isn't used), point 20 semi bold, centre aligning; the authors surnames (point 14 semi bold type, the right-edge aligning), the organization name, post address, town, country and e-mail of corresponding author.

The abstract should be 250–300 words without formulas and literature references. In case a manuscript is presented in Russian, the abstract should be repeated in English with the article heading (title), surnames and names in this language. In case a manuscript is presented in English, the Russian variant must be supplied. The abstracts are typed in Times New Roman (12 point) in one file in the following order: the article heading (title), the authors, the name of the organization, the abstract text in Russian with the further information in 2 lines in the same sequence in English. The abstracts are also published in the journal site (in Russian and in English). Keywords (5–8) that reflect the theme of the article must be specified at the end of the abstract.

The article text is typed in Times New Roman (14 pt) through an ordinary interval aligning along the format. A subtitle is typed in italics, aligning along the left edge. The common terms, measurement units and conventional symbols similar to the whole article are used. The decoding of all symbols is given for the first text use. The Latin alphabet letters are typed in the italics while the Greek letters in the straight type. The mathematical symbols $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, $\cos$, $\sin$, $\min$, $\max$, etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements (H_2O) and measurement units (MW/cm^2) and must be of the straight (ordinary) type. One shouldn't mix similar written letters of the Latin, Greek and Russian alphabets and should use the proper macros. The letters I and J, v and u, e and l, h and n, q and g, V and U, O (letter) and 0 (zero) must differ in inscribing. There must be a sign of the continuous gap between a value figure meaning and its dimension. The hyphen is not used; the gap character also mustn't be used in the text for the lay-out. The formulas are designed with the help of the built-in formulas processor (Microsoft Equation), the enumeration being done in the round brackets (2), aligned along the right edge; the decoding of all signs (letters) in the formulas is given in the order of the formula reference. To avoid the errors and misunderstandings, the editorial staff recommends the authors to use the Latin, Greek and other (not Russian) alphabet letters in the

formulas and to keep to the omission sizes while the formulas printing. Large formulas must be divided into separate fragments. If possible, the fragments must be independent; each line is a separate object. The enumeration and punctuation marks should be put into an ordinary text separately from the formulas. The tables, pictures and photos are placed inside the text and must have a through numeration along the text 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. 2026 г. Том 16)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 06.04.2026 г. Дата фактического выхода 08.04.2026 г.

Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.

Гарнитура «Times». Усл. печ. лист 30,2.

Тираж 100 экз. Заказ № 27.

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