

ISSN 2221-3198

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 2 / 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
№ 2 / 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 – Ущелье Адайком (К.С. Харебов)

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

Editor in Chief

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

Deputy Editor in Chief

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

Members of Editorial board

Vladimir A. Babeshko, Academician of RAS, Kuban
State University, Krasnodar, Russian Federation
Alexey D. Gvishiani, Academician of RAS, Geophysical
Centre of RAS, Moscow, Russian Federation
Mikhail Ch. Zalikhanov, Academician of RAS, High
Mountain Geophysical Institute, Nalchik,
Russian Federation
Gurban J. Yetirmishli, Academician of Azerbaijan
National Academy of Sciences (ANAS), Republican
Seismic Survey Centre of ANAS, Azerbaijan
Tamaz L. Chelidze, Academician of Georgian National
Academy of Sciences (GNAS), Geophysics of Ivane
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 – Adaykom Gorge (K.S. Kharebov)

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕКТНИКА И ГЕОДИНАМИКА

Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л.

- Реологическая стратификация земной коры Восточного сегмента Большого Кавказа по профилю ГСЗ
Волгоград-Нахичевань 8

ГЕОФИЗИКА

Вольвач А.Е., Дмитроца А.И., Неяченко Д.И.

- Геодинамические ограничения сейсмической опасности Крыма по данным космической
геодезии (РСДБ, ЛЛС, ГНСС) 20

Глазунов В.В., Зеликман Д.И., Ефимова Н.Н., Букатов А.А.

- Локализация скрытых зон развития опасных геологических процессов в прибрежном клифе городища
«Херсонес Таврический» с помощью методов инженерной геофизики 32

Голик В.И.

- Геофизический контроль инновационных технологий разработки рудных месторождений
Северной Осетии 45

Карапетян Дж.К., Айрапетян О.Ю., Элоян А.В., Карапетян Р.К., Шахпаронян С.Р.

- Оценка динамических характеристик и сейсмической уязвимости шестиэтажного железобетонного здания
в Армении с использованием метода Накамуры 57

Меликов Р.И., Бабаев Г.Р.

- Идентификация сейсмофациальных тел на основе частотно-временных атрибутов и самоорганизующихся
карт Кохонена 71

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Панфилов И.А., Водяников В.Т., Прудкий А.С., Лосев А.Н., Модина М.А.

- Интеллектуальная обработка данных геофизического каротажа для оценки трещиноватости
карбонатных коллекторов 85

Ступина А.А., Евсюков Д.Ю., Степанцевич М.Н., Никаноров М.С., Дорофеев Е.М.

- Прогноз геодинамически активных зон Предкавказья на основе анализа временных рядов
микросейсмических наблюдений 97

Тынченко В.С., Журавлев М.В., Ягудаева Н.А., Торопцев В.В., Григорян А.Г.

- Применение методов машинного обучения для автоматизированной классификации магнитных аномалий
Северного Кавказа по данным аэрогеофизической съемки 108

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Парада С.Г.

- Геолого-геофизические условия локализации золотоносных минерализаций Барило-Крепинского
рудного поля (Восточный Донбасс) 120

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Гасумов Э.Р., Гасумов Р.А.

- Определение допустимого количества углекислого газа для размещения в геологической структуре 132

Ларичев В.В., Попков В.И., Попков И.В.

Подземная гидросфера нефтегазоносных осадочных бассейнов..... 145

Мухаметшин В.Ш., Гилязетдинов Р.А., Садуакасов Д.С., Бакиева А.Б.Алгоритм выбора скважин-кандидатов для зарезки боковых стволов в условиях неопределенности
геолого-промысловой информации..... 160**Соколов Д.В.**Оценка перспектив нефтегазоносности среднемиоценовых отложений западной акватории
Среднего Каспия на основе бассейнового анализа..... 173

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Бекмурзаева Л.Р.Изменчивость агроклиматических условий Чеченской Республики и их влияние на урожайность
зерновых культур..... 186**Керимов И.А., Братков В.В., Бекмурзаева Л.Р.**Оценка внутригодичной динамики полупустынных ландшафтов по данным дистанционного
зондирования Земли..... 198**Коптева А.К.**Геоэкологические аспекты трансформации гидросферы на участках «мокрой» ликвидации угольных шахт
(на примере шахты «Вергелевской») 209**Склярченко Г.Ю., Шехурдин Г.Р., Наставкин А.В.**Породные отвалы угледобывающих предприятий как элемент городской среды населённых пунктов
Восточного Донбасса (на примере г. Шахты Ростовской области)..... 220

ГЕОГРАФИЯ

Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х.

Прорывы озёр в 2025 году: причины и последствия..... 232

ГЕОИНФОРМАТИКА

Ермолаева О.С., Курашкин С.О., Пучкова О.С., Бабкина А.В., Иванов О.В.Геоинформационное моделирование зон подтопления горных территорий Северного Кавказа на основе
спутниковых и метеорологических данных..... 244**Кукарцев В.В., Потапов Б.В., Пчелкин В.В., Вахрушева И.А., Матасова И.Ю.**Использование нейросетевых алгоритмов для прогноза коллекторских свойств нефтегазоносных пород
по геофизическим данным скважин..... 256

ЮБИЛЕИ

Василий Иванович Попков..... 268

CONTENTS

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

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

- Rheological stratification of the Earth's crust of the Eastern segment of the Greater Caucasus along the Volgograd-Nakhichevan DSS profile8

GEOPHYSICS

Volvach A.E., Dmitrotsa A.I., Neyachenko D.I.

- Geodynamic constraints on seismic hazard in Crimea based on space geodetic data (VLBI, SLR, GNSS)20

Glazunov V.V., Zelikman D.I., Efimova N.N., Bukatov A.A.

- Localization of hidden zones of hazardous geological process development in the coastal cliff of the Chersonesos Taurica Ancient settlement using engineering geophysics methods 32

Golik V.I.

- Geophysical monitoring of innovative technologies for the development of ore deposits in North Ossetia 45

Karapetyan J.K., Hayrapetyan H.Yu., Eloyan A.V., Karapetyan R.K., Shahparonyan S.R.

- Assessment of dynamic characteristics and seismic vulnerability of a six-storey reinforced concrete building in Armenia using the Nakamura method 57

Malikov R.I., Babayev G.R.

- Identification of seismic facies objects using time-frequency attributes and self-organizing neural networks 71

GEOPHYSICAL METHODS

Panfilov I.A., Vodyannikov V.T., Prudkiy A.S., Losev A.N., Modina M.A.

- Intelligent processing of geophysical logging data for assessing fractures in carbonate reservoirs 85

Stupina A.A., Evsyukov D.Yu., Stepantsevich M.N., Nikanorov M.S., Dorofeev E.M.

- Prediction of geodynamically active zones of the Ciscaucasia based on the analysis of time series of microseismic observations 97

Tynchenko V.S., Zhuravlev M.V., Yagudaeva N.A., Toroptsev V.V., Grigoryan A.G.

- Application of machine learning methods for automated classification of magnetic anomalies of the North Caucasus based on airborne geophysical survey data 108

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY

Parada S.G.

- Geological and geophysical conditions for localization of gold-bearing mineralizations of the Barilo-Krepin ore field (Eastern Donbass) 120

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF OIL AND GAS FIELDS

Gasumov E.R., Gasumov R.A.

- Determination of the permissible amount of carbon dioxide for placement in a geological structure 132

Larichev V.V., Popkov V.I., Popkov I.V.

Underground hydrosphere of oil-and-gas-rich sedimentary basins 145

Mukhametshin V.Sh., Gilyazetdinov R.A., Saduakassov D.S., Bakiyeva A.B.Algorithm for selecting candidate wells for sidetracking under conditions of uncertain geological
and field data 160**Sokolov D.V.**Assessment of hydrocarbon potential of the middle miocene deposits in the Western Middle Caspian Sea
based on basin modeling 173

GEOECOLOGY

Bekmurzaeva L.R.

Variability of agro-climatic conditions of the Chechen Republic and their impact on grain yields 186

Kerimov I.A., Bratkov V.V., Bekmurzaeva L.R.

Assessment of intraannual dynamics of semi-desert landscapes based on remote sensing data 198

Kopteva A.K.Geoeological aspects of hydrosphere transformation in the areas of "wet" coal mine liquidation
(case study of the Vergelevskaya mine) 209**Sklyarenko G.Yu., Shehurdin G.R., Nastavkin A.V.**Coal mining slagheaps as a component of urbanized landscapes in the Eastern part of Donets
coal basin (for example, Shakhty city district, Rostov region) 220

GEOGRAPHY

Bekkiev M.Y., Dokukin M.D., Kalov R.H.

Lake outbursts in 2025: causes and consequences 232

GEOINFORMATICS

Ermolaeva O.S., Kurashkin S.O., Puchkova O.S., Babkina A.V., Ivanov O.V.Geoinformation modeling of flood zones in mountainous areas of the North Caucasus based on satellite
and meteorological data 244**Kukartsev V.V., Potapov B.V., Pchelkin V.V., Vakhrusheva I.A., Matasova I.Yu.**Using neural network algorithms for predicting reservoir properties of oil and gas-bearing rocks based
on geophysical well data 256

JUBILEES

Vasily Ivanovich Popkov 268

УДК 550.34:551.1(082)

DOI: 10.46698/VNC.2026.94.56.001

Оригинальная статья

Реологическая стратификация земной коры Восточного сегмента Большого Кавказа по профилю ГСЗ Волгоград-Нахичевань

В.В. Стогний¹, Г.А. Стогний¹, Н.Л. Пономарева²

¹ Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002,
г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: stogny_vv@mail.ru;

² Единая геофизическая служба РАН, Россия, 249035, г. Обнинск,
пр. Ленина, 189

Статья поступила: 14.03.2026; доработана: 20.05.2026; принята к публикации: 22.05.2026

Резюме: Актуальность работы. Реологический подход изучения земной коры является одним из эффективных инструментов при анализе как палеогеодинамики, так и современных геодинамических условий сейсмоактивных регионов, поэтому исследования этого направления актуальны. **Цель работы.** На основе имеющихся материалов глубинного строения Восточного сегмента мегантиклинория Большого Кавказа по региональному профилю ГСЗ Волгоград-Нахичевань разработать его реологическую модель и выполнить ее анализ с позиций палеогеодинамики и современной геодинамики. **Методы и методология исследования.** Методика построения реологической модели литосферы регионального профиля Волгоград-Нахичевань базировалась на выявлении реологических закономерностей отдельных профилей обобщенной прочности и их увязки в соответствии со структурными особенностями глубинного строения разреза. **Результаты работы.** Реологическая модель земной коры по региональному профилю ГСЗ Волгоград-Нахичевань послужила основой разработки геодинамики Осевой мегазоны Большого Кавказа и прилегающих территорий. Показано, что формирование структуры Осевой мегазоны Восточного сегмента Большого Кавказа происходило за счет подтока вещества/энергии Скифской плиты в южном направлении. Этот процесс способствовал компенсационному опусканию границы Мохоровичича (до 60 км) южного фланга Скифской плиты. Обоснована необходимость дальнейших реологических исследований механизма формирования тектонических напряжений на верхнемантийном уровне.

Ключевые слова: Большой Кавказ, Скифская плита, Закавказская плита, консолидированная кора, профиль обобщенной прочности литосферы.

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию Геофизического института ВНЦ РАН, рег. № НИОКТР 125022803002-1.

Для цитирования: Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л. Реологическая стратификация земной коры Восточного сегмента Большого Кавказа по профилю ГСЗ Волгоград-Нахичевань. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 8–19. DOI: 10.46698/VNC.2026.94.56.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.94.56.001

Original paper

Rheological stratification of the Earth's crust of the Eastern segment of the Greater Caucasus along the Volgograd-Nakhichevan DSS profile

V.V. Stogny¹, G.A. Stogny¹, N.L. Ponomareva²

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

e-mail: stogny_vv@mail.ru;

² Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 189 Lenina Ave.,
Obninsk 249035, Russian Federation

Received: 14.03.2026; revised: 20.05.2026, accepted: 22.05.2026

Abstract: Relevance. The rheological approach to studying the Earth's crust is an effective tool for analyzing seismically active regions both the paleogeodynamics and modern geodynamic conditions, making research in this area highly relevant. **Aim.** Based on available data on the deep structure of the Eastern segment of the Greater Caucasus along Volgograd-Nakhichevan regional profile, this study aims to develop a rheological model and analyze it from a paleogeodynamics and modern geodynamics perspective. **Research methods and methodology.** The methodology for constructing a rheological model of the lithosphere along the Volgograd-Nakhichevan regional profile was based on identifying rheological patterns of generalized strength profiles and linking them to the features of the deep structure section. **Results.** The rheological model of the Earth's crust along Volgograd-Nakhichevan regional profile was the basis for developing the geodynamics of the Greater Caucasus Axial Megazone and adjacent territories. It is shown that structure of the Eastern segment Axial Megazone Greater Caucasus was formed due to the matter/energy influx from Scythian Plate from the north. This process contributed to the compensatory subsidence of Mohorovichich (up to 60 km) boundary on the Scythian Plate southern flank. The need for further rheological research to develop a mechanism for the formation of tectonic stresses at the upper mantle level of the southern flank of the Scythian Plate is substantiated.

Keywords: Greater Caucasus, Scythian Plate, Transcaucasian Plate, consolidated crust, generalized lithospheric strength profile.

Acknowledgments: This work was carried out according to the state assignment of the Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, No. 125022803002-1.

For citation: Stogny V.V., Stogny G.A., Ponomareva N.L. Rheological stratification of the Earth's crust of the Eastern segment of the Greater Caucasus along the VolgogradNakhichevan DSS profile. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 8–19. DOI: 10.46698/VNC.2026.94.56.001

Введение

Профили ГСЗ Степное–Бакуриани и Волгоград–Нахичевань, пройденные в 1960-х гг. [Краснопевцева и др., 1967, 1970], содержат важный материал для изучения глубинного строения Большого Кавказа и прилегающих территорий. Переинтерпретация этих материалов с использованием различных программных комплексов и методологических подходов выполнена в работах [Павленкова, 2012; Гонгадзе, 2016; Гонгадзе и др., 2016]. Профиль ГСЗ Степное–Бакуриани пересекает восточную часть Центрального сегмента Большого Кавказа в направлении С-СВ–Ю–ЮЗ, а профиль ГСЗ Волгоград–Нахичевань в субмеридиональном направлении – западную часть

Восточного сегмента. Модель реологической стратификации литосферы по профилю Степное–Бакуриани представлена в [Стогний, Стогний, 2024].

Структура Закавказской и Скифской плит, представленная Спитакским профилем ГСЗ Малого Кавказа и профилями ГСЗ Степное–Бакуриани и Волгоград–Нахичевань Большого Кавказа, охарактеризована методом лучевого моделирования по наблюдаемым годографам *P*- и *S*-волн [Павленкова, 2019]. Отмечено, что земная кора Малого Кавказа имеет такую же мощность (50–55 км), что и кора Большого Кавказа (50–60 км), но отличается более выраженной скоростной неоднородностью, что свидетельствует о разной природе тектонических процессов их формирования.

По [Бубнов и др., 2025], петрологические модели *N-Q* магматизма Кавказского региона свидетельствуют в пользу подобия глубинным «астеносферно-плюмовым» геодинамическим обстановкам его становления на Большом и Малом Кавказе, магматические ассоциации которых являются субдукционно модифицированными (при мезозойских и возможно для Малого Кавказа палеогеновых субдукционных событиях).

В работе [Shempelev et al., 2020] предполагается, что вулканы Северного Кавказа Эльбрус и Казбек возникли в коллизионной обстановке, элементы субдукции не проявляются, а кинематика Главного Кавказского надвига соответствует структуре коллизионного сжатия.

Процесс формирования структуры коллизионного орогена Большого Кавказа отражен в многочисленных публикациях [Большой Кавказ..., 2007; Ершов и др., 2026; Лукк, Шевченко, 2019; Рогожин и др., 2015; Сенин и др., 2022; Phillip et al., 1989; Reilinger et al., 2006].

По [Большой Кавказ..., 2007], в Восточном сегменте Большого Кавказа в альпийский этап не происходило фундаментальной переработки земной коры. Граница M_1 верхней мантии является реликтом более древней подошвы земной коры [Трифонов и др., 2020], вышележащие слои над которой были метаморфически уплотнены до мантийных значений.

Северные тектонические зоны испытали несколько фаз киммерийской эпохи деформаций [Трифонов, 2016]. На Кавказе они начались в позднем байосе, продолжались в бате и достигли максимума перед келловеем. В пределах Центрального Кавказа интенсивные деформации привели к поднятию и выходу на поверхность герцинского фундамента. На Восточном Кавказе, несмотря на интенсивные киммерийские деформации, степень размыва оказалась меньше и отразилась угловым несогласием в основании вышележащих толщ. Ускорение поднятия Центрального сегмента в плиоцен-четвертичное время может быть обусловлено проникновением под него потока разуплотненной и разогретой мантии Африканского (Эфиопско-Афарского) суперплюма [Трифонов, 2026]. Четвертичный подъем Восточного Кавказа происходил быстрее, чем Центрального Кавказа и составил ~60 % от общего поднятия, тогда как на Центральном Кавказе он не превышал 50 %.

Геологическое строение Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа существенно различается. Большая часть площади Осовой мегазоны мегантиклинория Большого Кавказа в пределах горст-антиклинория Восточного сегмента сложена ниже- и среднеюрскими отложениями, выходы метаморфических пород фундамента и магматических комплексов практически отсутствуют.

Цель проведенных исследований заключалась в разработке модели реологической стратификации литосферы по региональному профилю ГСЗ Волгоград–Нахичевань и оценке влияния реологических условий на палеогеодинамические процессы формирования главных структурных особенностей земной коры в полосе данного профиля и современных геодинамических процессов, отражающихся в закономерностях сейсмичности региона.

Материалы и методика исследований

Реологические исследования структуры сейсмоактивных регионов являются одним из актуальных направлений геолого-геофизических исследований и применяются в различных регионах мира [Katayama et al., 2022; Orug et al., 2019].

Основой разработки модели реологической стратификации земной коры Восточного сегмента Большого Кавказа и прилегающих районов северного фланга Закавказской плиты и южного фланга Скифской плиты послужил скоростной разрез профиля ГСЗ Волгоград-Нахичевань в интерпретации Н.И. Павленковой [2012]. Положение профиля дано на схеме строения консолидированной коры Центрального Кавказа (рис. 1).

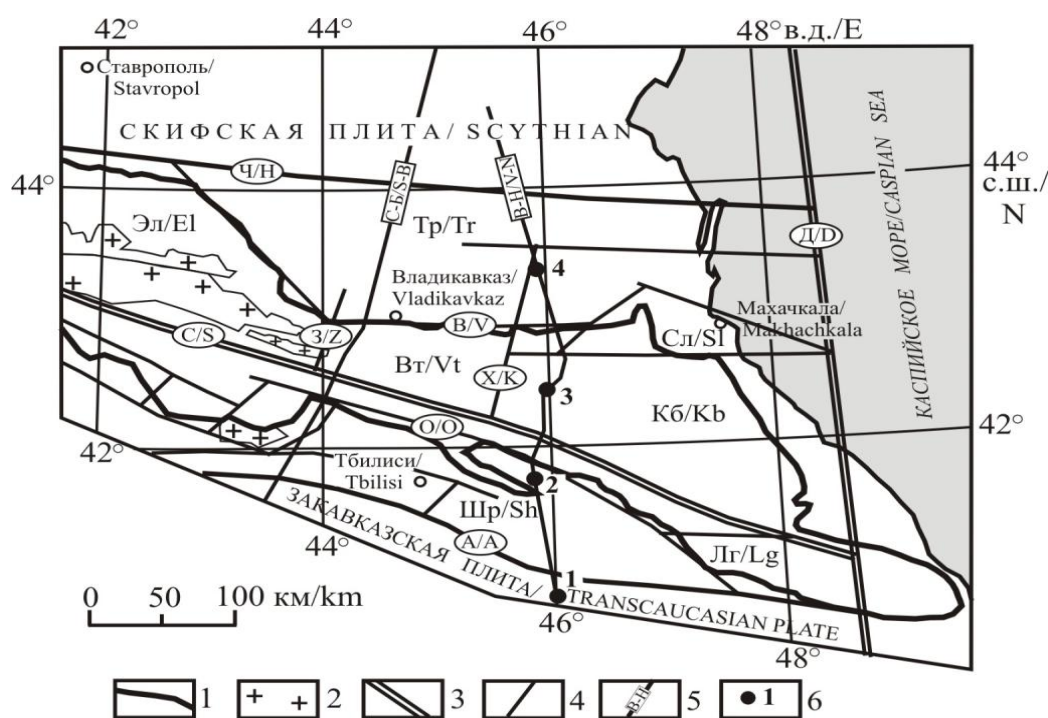


Рис. 1. Положение профиля ГСЗ Волгоград-Нахичевань и расчетных профилей обобщенной прочности литосферы Большого Кавказа на схеме консолидированной коры по [Стогний, Стогний, 2023].

1 – границы мегантиклинория Большого Кавказа; 2 – выходы кристаллических пород Центрального сегмента и Дзирульского массива; 3 – межплитные разломы: Д – Дербент-Ленкоранский, С – Сването-Алазанский; 4 – межблоковые разломы: Ч – Черкесско-Кизлярский, А – Аджаро-Мингечаурский, В – Владикавказский, О – Онийский, З – Згитский, Х – Халкилойский; 5 – геофизические профили ГСЗ: С-Б – Степное-Бакуриани, В-Н – Волгоград-Нахичевань; 6 – расчетные профили обобщенной прочности литосферы и их номера. Блоки консолидированной коры: Эл – Эльбрусский, Кб – Кубачинский, Тр – Терский, Шр – Ширакский, Вм – Верхнетерский, Лг – Лагинский, Сл – Сулакский /

Fig. 1. The position of the Volgograd-Nakhichevan DSS profile and Greater Caucasus lithosphere generalized strength profiles on the consolidated crust scheme according to [Stogny, Stogny, 2023]. 1 – Greater Caucasus meganticlinorium boundaries; 2 – outcrops crystalline rocks of the Central segment and Dzirul massif; 3 – interplate faults: D – Derbent-Lenkoransky, S – Svaneto-Alazansky; 4 – interblock faults: Ch – Cherkessko-Kizlyarsky, A – Adzharo-Mingechaursky, V – Vladikavkazsky, O – Oniysky, Z – Zgitsky, Kh – Khalkiloysky; 5 – deep seismic sounding geophysical profiles: S-B – Stepnoe-Bakuriany, V-N – Volgograd-Nakhichevan; 6 – generalized strength of lithosphere profiles calculated and their numbers. Blocks of consolidated crust: El – Elbrusky, Kb – Kubachinsky, Tr – Tersky, Shr – Shiraksky, Vt – Verkhnetersky, LG – Laginsky, Sl – Sulaksky /

Для этого регионального профиля, как и при исследовании реологической стратификации земной коры по профилю Степное–Бакуриани [Стогний, Стогний, 2024], выбраны четыре точки расчетных профилей обобщенной прочности литосферы. Местоположение точек (в скобках – их координаты в км) показано на рисунке 2а: 1(120), 2(250), 3(350), 4(440).

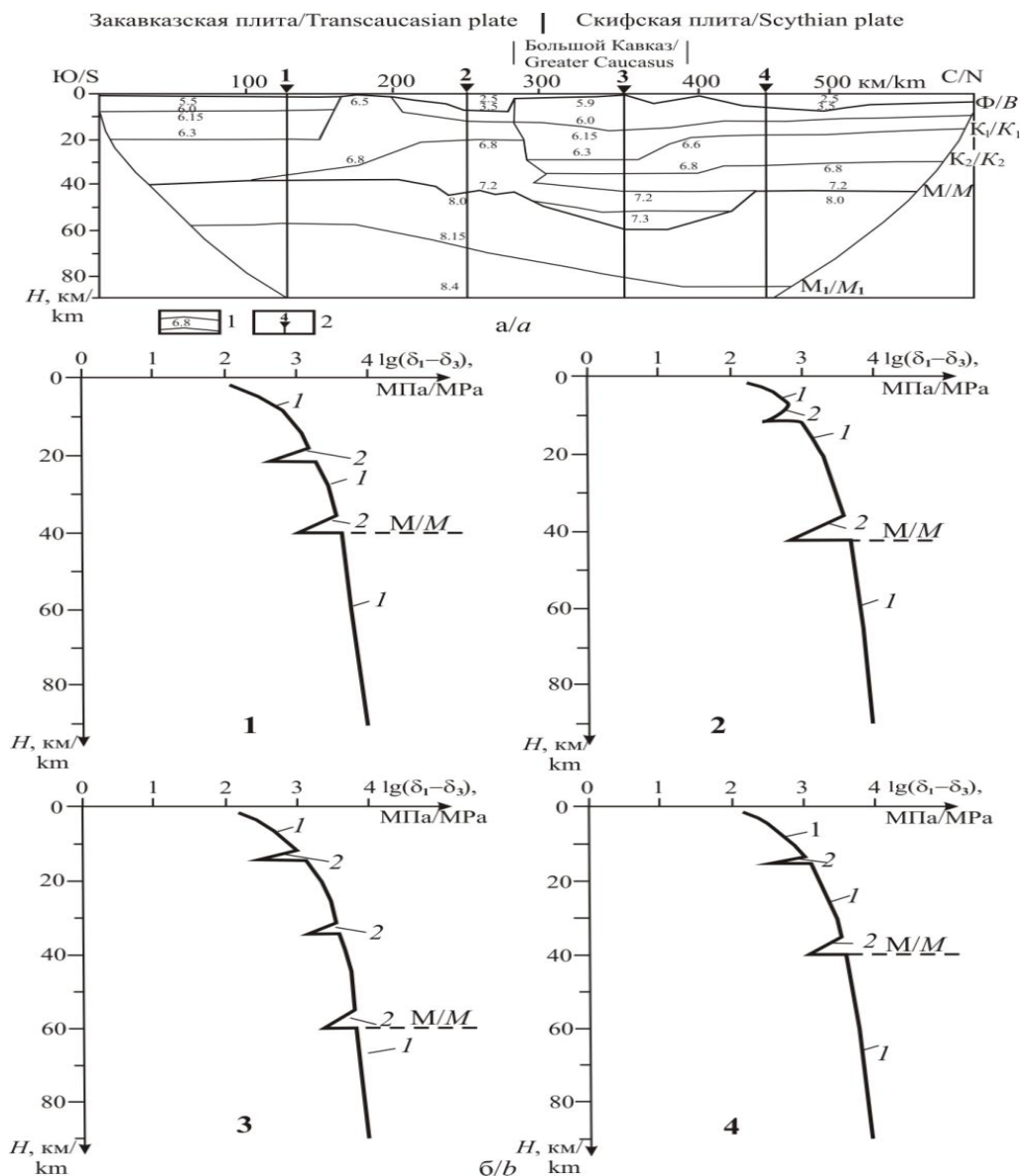


Рис. 2. Скоростной разрез земной коры Восточного сегмента Большого Кавказа по профилю ГСЗ Волгоград–Нахичевань [Павленкова, 2012] (а) и реологические профили обобщенной прочности литосферы (б).

(а): 1 – границы слоев с разными сейсмическими скоростями, цифры – скорости продольных волн, км/с; 2 – профили обобщенной прочности литосферы и их номера (1–4).

Границы: Φ – кристаллического фундамента; K_1 , K_2 – консолидированной коры, M – Мохоровичича, M_1 – верхней мантии. (б): кривые обобщенной прочности литосферы (1–4): 1 – при хрупком разрушении, 2 – «криповая» прочность. M – граница Мохоровичича /

Fig. 2. Velocity section of the Earth's crust in the Greater Caucasus Eastern segment along Volgograd–Nakhichevan profile DSS [Pavlenkova, 2012] (a) and profiles of the generalized strength lithosphere (b).

(a): 1 – boundaries of layers with different seismic velocities, numbers – wave longitudinal velocities, km/s; 2 – generalized strength lithosphere profiles and numbers their (1–4).

Boundaries: F – crystalline basement; K_1 , K_2 – consolidated crust, M – Mohorovičić, M_1 – upper mantle. (b): generalized strength lithosphere curves (1–4): 1 – for brittle failure, 2 – “creep” strength M – Mohorovičić boundary

Согласно скоростному разрезу по профилю ГСЗ в точке 1 мощность земной коры составляет 40 км, в ее верхней части (до 20 км) скорость продольных волн V_p (в км/с) изменяется от 5.5 до 6.3, а в нижней – преимущественно в пределах скоростей среднего слоя ($V_p=6.3–6.8$). В точке 2 верхняя часть разреза представлена осадочными отложениями межгорной впадины (до 7 км, $V_p=2.5–3.5$), а нижняя часть консолидированной коры (20–40 км) имеет скорости, характерные для нижнего слоя ($V_p=6.8–7.2$). В точке 3 Осовой мегазоны Большого Кавказа разрез более дифференцирован, верхняя часть консолидированной коры (до границы K_1 на глубине 30 км) имеет $V_p=5.9–6.3$, средняя с границами K_1 и K_2 – $V_p=6.6–6.8$, а нижняя, с глубиной от 35 до 60 км, представлена тремя слоями с $V_p=6.8–7.2$. В верхней части разреза точки 4 (до глубины 10 км) распространены осадочные отложения Терско-Каспийского прогиба с $V_p=2.5–3.5$, а консолидированная кора представлена типичным трехслойным разрезом с глубиной подошвы 40 км. Глубина границы M_1 верхней мантии с контрастом скоростей от 8.15 до 8.4 км/с в пределах профиля увеличивается с юга на север от 60 до 80 км.

Методика реологических исследований, разработанная Г. Раналли [Ranalli, 1987; Ranalli, Murphy, 1987] и нашедшая применение в обосновании моделей тектонической расслоенности литосферы [Белов и др., 1990], базируется на сопоставлении значений разности максимальных и минимальных сжимающих напряжений, рассчитанных при хрупком разрушении согласно закону Кулона-Биерли и криповой прочности, и обосновании типа разрушения и подвижки на соответствующих интервалах профиля обобщенной прочности литосферы (одномерный вариант D_I). Вместе с тем, методика таких расчетов в различных регионах и при различных подходах может меняться, что требует дополнительных пояснений.

Для закона сухого трения Кулона-Биерли логарифм разности максимального и минимального сжимающих напряжений $\lg(\delta_1 - \delta_3)_i$ каждого i -го интервала m -слояного разреза определяется уравнением:

$$\lg(\delta_1 - \delta_3)_i \geq \beta \cdot \sum_{z=0}^{z_{\max}} \rho_{ij} \cdot \Delta z_i \cdot g, \quad (1)$$

где β – параметр, зависящий от типа разрушения и подвижки (при расчетах для всех слоев принят равным 3,0 – надвиг); z – текущий параметр глубины; ρ_{ij} – плотность (в кг/м³) i -го интервала j -го слоя разреза ($j=1 \dots m$) и Δz_i – мощность i -го интервала разреза (результат вычислений относится к подошве каждого i -го интервала); g – среднее значение силы тяжести (при расчётах принято равным 9,8 м/с²); $z_{\max}$ – предельная глубина исследований (принята равной 90 км в соответствии со скоростным разрезом рис. 2а).

Логарифм разности максимального и минимального сжимающих напряжений $\lg(\delta_1 - \delta_3)_i$ в каждой i -ой точке разреза для пластического режима деформирования в режиме установившейся ползучести (дислокационного крипа) определяется уравнением:

$$\lg(\delta_1 - \delta_3)_i = \left(\frac{U}{A_{ij}} \right)^{1/n_{ij}} \cdot \exp \left(\frac{E_{ij}}{n_{ij} \cdot R \cdot T(z_i)} \right), \quad (2)$$

где U – скорость деформации (принятое значение $U = 10^{-15}$ 1/с); R – газовая постоянная ($R = 8.31441$ Дж/моль·К); A_{ij} , E_{ij} , n_{ij} – материальные реологические константы i -го интервала j -го слоя разреза; $T(z_i)$ – температура Кельвина (z_i – текущий параметр глубины).

Значения плотности слоев структурно-вещественных комплексов земной коры и верхней мантии ρ_j (кг/м³) рассчитывались согласно корреляционной зависимости плотности ρ от скорости продольных волн V_p (км/с) для Центрального Кавказа [Шенгелая, 1984]. Реологические параметры A_j , E_j , n_j отдельных слоев выбирались по методике, принятой в [Стогний, Стогний, 2024]. Расчет температуры каждой точки

глубины z_i разреза выполнялся исходя из условия, что температура на поверхности Мохоровичича везде постоянна и соответствует 600 °С.

Профили 1–4 логарифма разности максимального и минимального сжимающих напряжений обобщенной прочности литосферы, полученные по принятой методике (рис. 2б), составили основу при разработке модели реологической стратификации профиля Волгоград-Нахичевань.

Результаты исследований и их обсуждение

Реологическая модель профиля Волгоград-Нахичевань, построенная на основе интерполяции и увязки профилей обобщенной прочности литосферы, приведена на рисунке 3. На разрез вынесены также гипоцентры землетрясений (с $M_s \geq 3.5$), зарегистрированные в полосе профиля $46 \pm 0.3^\circ$ в.д. за период 2011–2024 гг.

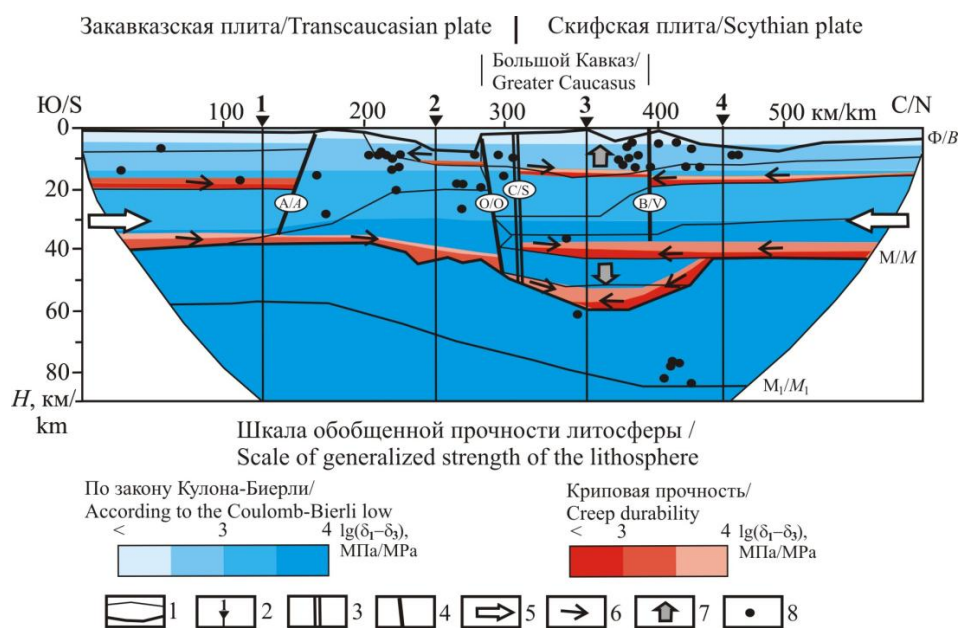


Рис. 3. Разрез реологической стратификации литосферы Восточного сегмента по профилю ГСЗ Волгоград-Нахичевань.

1 – границы слоев с разными сейсмическими скоростями [Павленкова, 2012]:

Ф – консолидированной коры, М – Мохоровичича, М₁ – верхней мантии; 2 – профили обобщенной прочности литосферы и их номера (1–4); 3 – межплитный разлом:

С – Сването-Алазанский; 4 – межблоковые разломы: А – Аджаро-Мингечаурский,

В – Владикавказский, О – Онийский; 5 – региональный тренд тектонических напряжений;

6 – направления движения вещества/энергии в горизонтах пластических течений (крипа);

7 – тренды орогенических движений Осевой мегазоны; 8 – гипоцентры землетрясений с $M_s \geq 3.5$

(по материалам ФИЦ ЕГС РАН по линии профиля Волгоград-Нахичевань /

Fig. 3. Lithosphere rheological stratification Eastern segment along the Volgograd-Nakhichevan DSS profile.

1 – different seismic velocities layers boundaries [Pavlenkova, 2012]: F – consolidated crust,

M – Mohorovičić, M₁ – upper mantle; 2 – curves of lithosphere generalized strength and their numbers

(1–4); 3 – interplate fault: S – Svaneto-Alazansky; 4 – interblock faults: A – Adzharo-Mingechaursky,

B – Vladikavkazsky, O – Oniysky; 5 – tectonic stress trend regional; 6 – matter/energy movement

directions in plastic flow horizons (creep); 7 – movement Axial Megazone orogenic trends; 8 – earthquake hypocenters with $M_s \geq 3.5$ (based on GS RAS data along the Volgograd-Nakhichevan DSS profile)

Региональный профиль ГСЗ Волгоград-Нахичевань пересекает южный фланг Скифской плиты и северный фланг Закавказской плиты, разделенные Сването-Алазанским разломом (рис. 1). Земная кора северного фланга Закавказской плиты содержит два слоя пластического (крипового) состояния. Реологическим упором для первого

слоя на глубине 18–20 км в низах верхней части земной коры в интервале профиля 0–150 км служит Аджаро-Мингечаурский разлом. Второй слой, приуроченный к границе Мохоровичича на глубине от 35 до 40–50 км, ограничен с севера реологическим упором Онийского разлома. На подошве верхнего слоя земной коры на глубине 8–10 км в интервале профиля 200–280 км локализован слой пластического состояния.

В интервале 390–600 км профиля южного фланга Скифской плиты содержится два слоя пластических течений (крипа). Верхний из них (16–18 км) локализован в низах верхнего слоя консолидированной земной коры с реологическим упором Владикавказского регионального разлома. Второй слой пластических течений приурочен к подошве земной коры (35–40 км).

В разрезе земной коры (интервал 310–390 км профиля) Скифской плиты выделено три слоя пластического (крипового) состояния на глубинах 12–15, 32–35 и 55–60 км, соответствующих подошве верхнего, среднего и нижнего слоев консолидированной коры. Южным реологическим упором для них служит межплитный Сването-Алазанский разлом со сменой направления пластического течения (крипа) с южного на северное. Наиболее активным, по-видимому, являлся слой на подошве земной коры, что обеспечило приращение его мощности (до 20 км) и формирование чашеобразной структуры нижней части Осевой мегазоны Большого Кавказа (глубиной 40–60 км по границе Мохоровичича). Одновременно происходило погружение структурно-вещественных комплексов в более плотные слои верхней мантии. Это вызвало «всплывание» комплексов Осевой мегазоны, создающих обратную нагрузку. Таким образом, процессы наращивания мощности земной коры, с одной стороны, и поверхностной эрозии (в соответствии с вещественным и структурно-тектоническим строением ВЧР), с другой стороны, обеспечивают некоторое динамическое равновесие этой системы (в геологическом масштабе времени).

Изучение структурно-надвиговых комплексов осадочных пород мегантиклинория Большого Кавказа на реологической основе возможно только при проведении специализированных исследований и в настоящей статье не рассматривается.

Современные геодинамические процессы находят отражение в закономерностях сейсмичности данного региона.

В пределах южного фланга Закавказской плиты тектонические напряжения, создаваемые слоем крипового состояния в подошве верхнего слоя консолидированной коры (интервал 0–150 км профиля), на реологическом упоре Ширакского блока, южным ограничением которого является Аджаро-Мингечаурский разлом, проявляются отдельными гипоцентрами землетрясений. Южнее разлома, в комплексах высокоплотных пород, напряженно-деформированное состояние также проявляется единичными очагами землетрясений. Сейсмическая активность отмечается в высокоплотных комплексах пород (интервал 200–230 км профиля), граничащих с относительно низкоплотным слоем, расположенным южнее. По-видимому, тектонические напряжения в этой части профиля возникали в результате действий в направлении север–юг, со стороны Онийского разлома, компенсируясь на реологическом упоре высокоплотных пород. При этом тектонические напряжения передаются через верхний слой консолидированной коры, в подошве которого расположен пластичный слой (интервал 200–280 км профиля).

Высокой сейсмической активностью проявляется зона Онийского разлома – реологического упора тектонических напряжений северного тренда, южным ограничением которой является реологический упор Сването-Алазанского межплитного разлома.

На южном фланге Скифской плиты сейсмической активностью проявляется зона Владикавказского разлома (интервал 370–440 км профиля), который представляет собой реологический упор для тектонических напряжений южного тренда, создаваемых при напоре пластичного слоя в подошве верхнего слоя консолидированной коры. В северной части Осевой мегазоны единичные гипоцентры зарегистрированы

в низах среднего слоя и в зоне подошвы земной коры, что также может свидетельствовать об их геодинамической активности при формировании структуры. В интервале профиля 370–440 км зарегистрированы землетрясения на глубине 70–80 км, приуроченные к границе M_1 верхней мантии.

В зонах разломов происходит смена реологических свойств, что способствует накоплению тектонических напряжений и их разрядке в виде землетрясений [Николаевский, Шаров, 1985]. В области Сването-Алазанского разлома можно отметить Кахетинское (Грузино-Дагестанское) землетрясение 17.09.2013 г. с $M=5.5$ и глубиной гипоцентра 15 км, которое возникло под действием напряжений сжатия, ориентированных в субмеридиональном направлении, и напряжений растяжения, ориентированных в субширотном направлении, тип движения – правосторонний сдвиг с компонентами взброса [Етирмишли и др., 2019]. Возможная природа верхнемантийных землетрясений Терско-Каспийского прогиба рассмотрена в [Стогний, Стогний, 2025]. Для реологического обоснования верхнемантийной геодинамики, отражающей соответствующей сейсмичностью, необходимы специальные исследования.

Анализ модели реологической стратификации земной коры профиля Волгоград-Нахичевань и расположенного к западу от него профиля Степное-Бакуриани позволяет отметить следующее. В разрезе профиля Степное-Бакуриани формирование структуры Осевой мегазоны происходило преимущественно за счет подтока вещества/энергии Закавказской плиты в северном направлении, а профиля Волгоград-Нахичевань – Скифской плиты в южном направлении. То есть, реологические условия являлись определяющими при формировании структуры земной коры мегантиклинория Большого Кавказа и прилегающих территорий.

Проведенные исследования реологического строения регионального профиля ГСЗ Волгоград-Нахичевань позволяют сформулировать следующие выводы.

Выводы

1. Предложена модель реологической стратификации литосферы по профилю ГСЗ Волгоград-Нахичевань, на основе которой проведен анализ реологической подвижности слоев земной коры при становлении Восточного сегмента Большого Кавказа.
2. Показано, что на коллизионном этапе формирования структуры Восточного сегмента Большого Кавказа и прилегающих территорий определяющим условием являлась реологическая стратификация земной коры.
3. В геодинамической обстановке «жесткой» коллизии Скифской и Закавказской плит в пределах Восточного сегмента преобладал подток вещества/энергии Скифской плиты в южном направлении, с формированием структуры Осевой мегазоны.
4. Проведен анализ современной сейсмичности западной части Восточного сегмента Большого Кавказа с учетом предложенной модели реологической стратификации земной коры регионального профиля Волгоград-Нахичевань.

Литература

1. Белов А.А., Буртман В.С., Зенкевич В.П. и др. Тектоническая расслоенность литосферы и региональные геологические исследования / Отв. ред. Ю.М. Пуцаровский, В.Г. Трифонов. – М.: Наука, 1990. – 293 с.
2. Большой Кавказ в альпийскую эпоху / Под ред. Ю.Г. Леонова. – М.: ГЕОС, 2007. – 368 с.
3. Бубнов С.Н., Кондрашов И.А., Гольцман Ю.Г., Олейникова Т.И. Основные черты обогащенного литосферного источника неоген-четвертичного магматизма Кавказа // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Т. XV. М: ИИЕТ РАН, 2025. – С. 240–248.
4. Гонгадзе С.А. Глубинное строение Большого Кавказа на основе геофизических данных по новым технологиям. Ч. 1. Гравиметрия, магнитометрия, локальная сейсмо-

мография и микросейсмозондирование // Геофизический журнал. – 2016. – Т. 38. № 3. – С. 145–154.

5. Гонгадзе С.А., Челидзе Т.Л., Миндели П.Ш., Глonti Н.Я., Кирия Д.К., Явловская О.В. Основные сечения земной коры и верхней мантии Большого Кавказа по новым технологиям. Ч. 2. Сейсмотомография по профилям глубинного сейсмического зондирования // Геофизический журнал. – 2016. – Т. 38. № 4. – С. 100–112.

6. Ершов А.В. Коротаев М.В., Никитин М.Ю. Модель воздымания и эрозии Восточного Кавказа на неотектоническом этапе // Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы – 2026. Материалы LVII Тектонического совещания. М: ГЕОС, 2026. – С. 172–176.

7. Етирмишли Г.Д., Маммадли Т.Я., Рогожин Е.А., Сысолин А.И. Сейсмическая активизация восточной части южного склона Большого Кавказа в конце XX – начале XXI в. // Геофизические процессы и биосфера. – 2019. – Т. 18. – С. 15–29.

8. Краснопевцева Г.В., Матушкин Б.А., Попов Е.А. Геофизические исследования на региональном профиле Волгоград–Нахичевань // Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. – 1967. – № 12. – С. 43–51.

9. Краснопевцева Г.В., Матушкин Б.А., Шевченко В.И. Новая интерпретация данных ГСЗ по профилю Степное–Бакуриани на Кавказе // Советская геология. – 1970. – № 8. – С. 113–120.

10. Лукк А.А., Шевченко В.И. Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа // Физика Земли. – 2019. – № 4. – С. 99–123.

11. Николаевский В.Н., Шаров В.И. Разломы и реологическая расслоенность земной коры // Физика Земли. – 1985. – № 1. – С. 16–28.

12. Павленкова Г.А. Строение земной коры Кавказа по профилям ГСЗ Степное–Бакуриани и Волгоград–Нахичевань (результаты переинтерпретации первичных данных) // Физика Земли. – 2012. – № 5. – С. 16–23.

13. Павленкова Г.А. Структура земной коры Малого Кавказа по данным глубинного сейсмического зондирования // Геофизические исследования. – 2019. – Т. 20. № 1. – С. 65–79.

14. Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Овсяченко А.Н., Андреева Н.В., Харазова Ю.В. Структура и современная геодинамика мегаантиклинория Большого Кавказа в свете новых данных о глубинном строении // Геотектоника. – 2015. – № 2. – С. 36–49.

15. Сенин В.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.

16. Стогний В.В., Стогний Г.А. Глубинное строение и реологическая стратификация земной коры Центрального сегмента Большого Кавказа // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 6–20. DOI: 10.46699/VNC.2024.37.52.001.

17. Стогний Г.А., Стогний В.В. Верхнемантийные землетрясения Терско-Каспийского прогиба Крымско-Кавказского сейсмического пояса: геолого-геофизический аспект // Ученые записки Крымского Федерального университета им. В.И. Вернадского. – 2025. – Т. 11(77). № 4. – С. 163–172.

18. 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.

19. Трифонов В.Г. Возраст новейшего поднятия Большого Кавказа в разных его сегментах // Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы – 2026. Материалы LVII Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2026. – С. 509–512.

20. Трифонов В.Г. Коллизия и горообразование // Геотектоника. – 2016. – № 1. – С. 1–23.

21. Трифонов В.Г., Соколов С.Ю., Соколов С.А., Хессами Х. Мезозойско-кайнозойская структура Черноморско-Кавказско-Каспийского региона и ее соотношение со строением верхней мантии // Геотектоника. – 2020. – № 3. – С. 55–81.

22. Шенгелая Г.Ш. Гравитационная модель земной коры Кавказа. М.: Наука, 1984. – 128 с.
23. Katayama J., Yoshida M., Hirauchi K.I. Effects of rheological stratification and elasticity of lithosphere on subduction initiation // *Frontiers in Earth Sciences*. – 2022. – Vol. 10. DOI: 10.3389/feart.2022.988320.
24. Orug B., Ulutaf E., Pamukgu O., Haluk Selim H., Sonmez T. Rheological stratification and spatial variations in the effective elastic thickness of the lithosphere underneath the central Anatolian region, Turkey // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2019. – Vol. 176. – pp. 1–7.
25. Phillip H., Cisternal A., Gvishiani A., Gorshkov A. The Caucasus: an actual example of the initial stage of continental collision // *Tectonophysics*. – 1989. – Vol. 161. – pp. 1–21.
26. Ranalli G. *Rheology of the Earth*. London: Allen and Unwin, 1987. – 336 p.
27. Ranalli G., Murphy D.C. Rheological stratification of the lithosphere // *Tectonophysics*. – 1987. – Vol. 132. – pp. 281–295.
28. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H. et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2006. – Vol. 111. No.5. Is. B05411.
29. Shempelev A.G., Zaalishvili V.B., Chotchaev K.O., Rogozhin E.A., Shamanovskaya S.P. Tectonic fragmentation and geodynamic regime of Elbrus and Kazbek volcanoes (Central Caucasus, Russia): results of the deep geophysical research // *Geotectonics*. – 2020. – No. 5. – pp. 652–664.

References

1. Belov A.A., Burtman V.S., Zenkevich V.P. et al. Tectonic layering of the lithosphere and regional geological studies. Eds. Yu.M. Pushcharovsky, V.G. Trifonov. Moscow. Nauka. 1990. 293 p. (In Russ.)
2. The Greater Caucasus during the Alpine Period. Ed. Yu.G. Leonov. Moscow. GEOS. 2007. 368 p. (In Russ.)
3. Bubnov S.N., Kondrashov I.A., Goltsman Yu.G., Oleynikova T.I. Main features of the enriched lithospheric source of the Neogene-Quaternary magmatism of the Caucasus. In: *Modern problems of Geology, Geophysics and Geoecology of the North Caucasus*. Vol. XV. Moscow. IIET RAS. 2025. pp. 240–248. (In Russ.)
4. Ghonghadze S.A. The Deep structure of the Greater Caucasus based on geophysical data obtained using new technologies. Part 1: gravimetry, magnetometry, local seismic tomography, and microseismic sounding. *Geophysical Journal*. 2016. Vol. 38. No. 3. pp. 145–154. (In Russ.)
5. Ghonghadze S.A., Chelidze T.L., Mindeli P.Sh., Ghlonti N.I., Kiria J.K., Yavolovskaya O.N. Cross-sections of the Earth's crust and upper mantle in the Greater Caucasus using new technologies. Part 2: Seismic tomography based on deep seismic sounding profiles. *Geophysical Journal*. 2016. Vol. 38. No. 4. pp. 100–112. (In Russ.)
6. Ershov A.V., Korotaev M.V., Nikitin M.Yu. Model of Eastern Caucasus stageuplift and erosion at the neotectonic. In: *Tectonics and Geodynamics of the Earth's Crust and Mantle: Fundamental Problems – 2026*. Materials of the LVII Tectonic Meeting. Moscow. GEOS. 2026. pp. 172–176. (In Russ.)
7. Etirmishvili G.D., Mammadli T.Ya., Rogozhin E.A., Sysolin A.I. Seismic activation of the eastern part of the southern slope of the Greater Caucasus in the late 20th – early 21st centuries. *Geophysical Processes and Biosphere*. 2019. Vol. 18. pp. 15–29. (In Russ.)
8. Krasnopevtseva G.V., Matushkin B.A., Popov E.A. Geophysical research on the Volgograd-Nakhichevan regional profile. *Izvestiya Akademii Nauk USSR. Seriya Geologicheskaya*. 1967. No. 12. pp. 43–51. (In Russ.)
9. Krasnopevtseva G.V., Matushkin B.A., Shevchenko V.I. New interpretation of deep seismic sounding data along the Stepnoe–Bakuriani profile in the Caucasus. *Sovetskaya Geologiya*. 1970. No. 8. pp. 113–120. (In Russ.)

10. Lukk A.A., Shevchenko V.I. Seismicity, tectonics and GPS geodynamics of the Caucasus. *Physics of the Earth*. 2019. No. 4. pp. 99–123. (In Russ.)
11. Nikolaevsky V.N., Sharov V.I. Faults and rheological stratification of the Earth's crust. *Physics of the Earth*. 1985. No. 1. pp. 16–28. (In Russ.)
12. Pavlenkova G.A. Crustal structure of the Caucasus from the Stepnoe-Bakuriani and Volgograd-Nakhichevan DSS profiles (reinterpretation of the primary data). *Physics of the Earth*. 2012. No. 5. pp. 16–23. (In Russ.)
13. Pavlenkova G.A. The Earth crust structure of the Lesser Caucasus from deep seismic sounding data. *Geophysical Research*. 2019. Vol. 20. No. 1. pp. 65–79. (In Russ.)
14. Rogozhin E.A., Gorbatiykov A.V., Stepanova M.Yu., Ovsyuchenko A.N., Andreeva N.V., Kharazova Yu.V. The structural framework and recent geodynamics of the Greater Caucasus meganticlinorium in the light of new data on its deep structure. *Geotectonics*. 2015. No. 2. pp. 36–49. (In Russ.)
15. Senin V.V., Kerimov V.Yu., Mustaev R.N., Leonchik M.I. Structural–geodynamic systems of the basement of the black Sea–Caspian Sea region: evolution in the late Paleozoic–Cenozoic. *Geotectonics*. 2022. No. 1. pp. 27–50. (In Russ.)
16. Stogny V.V., Stogny G.A. Deep structure and rheological stratification of the Earth's crust for the Greater Caucasus Central segment. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 6–20. DOI: 10.46699/VNC.2024.37.52.001. (In Russ.)
17. Stogny G.A., Stogny V.V. Upper mantle earthquakes of the Crimean-Caucasian seismic belt Terek-Caspian trough: geological and geophysical aspect. *Scientific Notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University*. 2025. Vol. 11(77). No. 4. pp. 163–172. (In Russ.)
18. Stogny G.A., Stogny V.V. The Scythian plate southern boundary in the system of block divis-ibility 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.)
19. Trifonov V.G. The age of the latest uplift of the Greater Caucasus in its different segments. In: *Tectonic and Geodynamics of the Earth's Crust and Mantle: Fundamental Problems – 2026. Materials of the LVII Tectonic Meeting*. Moscow. GEOS. 2026. pp. 509–512. (In Russ.)
20. Trifonov V.G. Collision and orogenesis. *Geotectonics*. 2016. No. 1. pp. 1–23. (In Russ.)
21. Trifonov V.G., Sokolov S.Yu., Sokolov S.A., Hessami H. Mesozoic-Cenozoic structure of the Black Sea-Caucasus-Caspian region and its relationship with the structure of the upper mantle. *Geotectonics*. 2020. No. 3. pp. 55–81. (In Russ.)
22. Shengelaya G.Sh. Gravity model of the Caucasus crust. Moscow. Nauka. 1984. 128 p. (In Russ.)
23. Katayama J., Yoshida M., Hirauchi K.I. Effects of rheological stratification and elasticity of lithosphere on subduction initiation. *Frontiers in Earth Sciences*. 2022. Vol. 10. DOI: 10.3389/feart.2022.988320.
24. Orug B., Ulutaf E., Pamukgu O., Haluk Selim H., Sonmez T. Rheological stratification and spatial variations in the effective elastic thickness of the lithosphere underneath the central Anatolian region, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2019. Vol. 176. pp. 1–7.
25. Phillip H., Cisternal A., Gvishiani A., Gorshkov A. The Caucasus: an actual example of the initial stage of continental collision. *Tectonophysics*. 1989. Vol. 161. pp. 1–21.
26. Ranalli G. *Rheology of the Earth*. London. Allen and Unwin. 1987. 336 p.
27. Ranalli G., Murphy D.C. Rheological stratification of the lithosphere. *Tectonophysics*. 1987. Vol. 132. pp. 281–295.
28. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H. et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2006. Vol. 111. No.5. Is. B05411.
29. Shempelev A.G., Zaalishvili V.B., Chotchaev K.O., Rogozhin E.A., Shamanovskaya S.P. Tectonic fragmentation and geodynamic regime of Elbrus and Kazbek volcanoes (Central Caucasus, Russia): results of the deep geophysical research. *Geotectonics*. 2020. No. 5. pp. 652–664.

УДК: 550.348.436

DOI: 10.46698/VNC.2026.15.57.001

Оригинальная статья

Геодинамические ограничения сейсмической опасности Крыма по данным космической геодезии (РСДБ, ЛЛС, ГНСС)

А.Е. Вольвач[✉], А.И. Дмитроца[✉], Д.И. Неяченко[✉]

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Россия, 298688, г. Ялта,
e-mail: volvach@bk.ru

Статья поступила: 10.02.2026, доработана: 05.06.2026, принята к публикации: 10.06.2026

Резюме: Актуальность работы. Оценка сейсмической опасности Южного берега Крыма требует учёта современных геодинамических данных, поскольку модели PSHA, основанные преимущественно на сейсмологических каталогах, сопровождаются значительной неопределённостью параметров повторяемости землетрясений и максимальной возможной магнитуды. Независимые кинематические ограничения позволяют уточнить уровень современной деформационной активности региона и повысить надёжность интерпретации сейсмического режима. **Цель исследования** – определить современные кинематические характеристики Крымского полуострова по данным космической геодезии и оценить их значение для интерпретации параметров сейсмической опасности, включая повторяемость землетрясений и возможные значения $M_{\max}$. **Методы исследования.** Использованы данные радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), спутниковых ГНСС-измерений и лазерной дальнометрии (ЛЛС), обработанные в системе отсчёта ITRF2020. Сейсмический анализ выполнен на основе сводного каталога землетрясений (1919–2026 гг.) с оценкой параметров закона Гутенберга–Рихтера для различных периодов полноты каталога. **Результаты.** Установлено, что абсолютная горизонтальная скорость движения Крыма составляет 34.2 мм/год, а относительная скорость в системе стабильной Евразии не превышает 3.5 мм/год, что указывает на внутриплитный характер современных деформаций. Вертикальные движения характеризуются устойчивым опусканием поверхности со скоростью 3–4 мм/год. Показано, что учёт геодезических ограничений согласуется с низким уровнем накопления тектонических напряжений и позволяет уточнить параметры повторяемости землетрясений и оценку сейсмического потенциала региона.

Ключевые слова: Крым, сейсмическая опасность, PSHA, GNSS, VLBI, деформация земной коры, закон Гутенберга–Рихтера, PGA.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН «КРАО РАН».

Для цитирования: Вольвач А.Е., Дмитроца А.И., Неяченко Д.И. Геодинамические ограничения сейсмической опасности Крыма по данным космической геодезии (РСДБ, ЛЛС, ГНСС). *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 20–31. DOI: 10.46698/VNC.2026.15.57.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.15.57.001

Original paper

Geodynamic constraints on seismic hazard in Crimea based on space geodetic data (VLBI, SLR, GNSS)

A.E. Volvach^{ORCID}, A.I. Dmitrotsa^{ORCID}, D.I. Neyachenko^{ORCID}Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences,
Yalta 298688, Russian Federation, e-mail: volvach@bk.ru

Received: 10.02.2026, revised: 05.06.2026, accepted: 10.06.2026

Abstract: Relevance. Seismic hazard assessment of the Southern Coast of Crimea requires the integration of modern geodynamic data. This is because traditional PSHA models rely primarily on seismological catalogs. As a result, these models introduce significant uncertainty when estimating earthquake recurrence rates and the maximum possible magnitude. Independent kinematic constraints help refine the level of present-day deformation and improve the reliability of seismic hazard interpretation. **Aim** of the study is to determine the present-day kinematic characteristics of the Crimean Peninsula using space geodetic data and to evaluate their significance for interpreting regional seismic hazard, including earthquake recurrence and possible values of $M_{\max}$. **Methods.** The study employs Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Global Navigation Satellite System (GNSS) measurements, and Satellite Laser Ranging (SLR) data processed in the ITRF2020 reference frame. Seismological analysis is based on a unified earthquake catalog (1919–2026), with Gutenberg–Richter parameters estimated separately for periods of different catalog completeness. **Results.** The absolute horizontal velocity of Crimea is 34.2 mm/yr, while the relative velocity in the stable Eurasia frame does not exceed 3.5 mm/yr, indicating an intraplate deformation regime. Vertical motions show persistent subsidence at a rate of 3–4 mm/yr. Incorporating geodetic constraints is consistent with low present-day strain accumulation and allows refinement of earthquake recurrence parameters and seismic potential of the region.

Keywords: Crimea, seismic hazard, PSHA, GNSS, VLBI, crustal deformation, Gutenberg–Richter law, PGA.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state assignment CrAO RAS.

For citation: Volvach A.E., Dmitrotsa A.I., Neyachenko D.I. Geodynamic constraints on seismic hazard in Crimea based on space geodetic data (VLBI, SLR, GNSS). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 20–31. DOI: 10.46698/VNC.2026.15.57.001

Введение

Разломная структура Крымского полуострова представлена системой крупных линейментов субширотного и северо-восточного простирания, подтверждённых геологическими и геофизическими данными. К числу наиболее значимых относятся Каркинитско–Сивашский, Донузлавский, Евпаторийско–Нижнегорский и Луккульско–Каменский разломы (рис. 1а), формирующие блоковое строение региона и контролирующие распределение современной сейсмичности [Сим и др., 2025].

Южный берег Крыма относится к наиболее сейсмоактивным районам Причерноморья. Сейсмичность региона определяется его положением на южной периферии Евразийской литосферной плиты и сложным строением Крымско–Черноморской области, где взаимодействуют Скифская платформа, Крымский ороген и Черноморская впадина [Пустовитенко и др., 1989; Sosson et al., 2017; Свалова, 2019]. Исторические и инструментальные данные свидетельствуют о возможности возникновения сильных землетрясений, включая события 1927 г. с магнитудами 6.7–6.8 [Kondorskaya, Shebalin, 1982]. С учётом высокой плотности населения и развитой инфраструктуры уточнение параметров сейсмической опасности региона имеет важное практическое значение.

Современные оценки сейсмической опасности основаны на вероятностном подходе PSHA, включающем анализ сейсмических каталогов, параметров повторяемости землетрясений, максимальной магнитуды и закономерностей затухания сейсмических воздействий [Cornell, 1968; McGuire, 2004]. Для расчёта пиковых ускорений грунта (PGA) применяются современные зависимости ground motion prediction equations (GMPE) [Akkar, Bommer, 2010; Campbell, Bozorgnia, 2014].

Значительный прогресс в изучении современных геодинамических процессов связан с развитием высокоточных космических геодезических методов – ГНСС, СЛД и РСДБ, обеспечивающих миллиметровую точность определения координат и позволяющих оценивать современные движения и деформации земной коры [Altamimi et al., 2023]. Геодезические данные могут использоваться как независимые ограничения при анализе скорости накопления деформаций и современной сейсмотектонической активности [Kreemer et al., 2014].

Настоящая работа посвящена анализу геодинамических ограничений параметров сейсмической опасности Южного берега Крыма на основе комплексного рассмотрения сейсмологических и геодезических данных. Используются региональный каталог землетрясений, результаты наблюдений на станции «Симеиз» (ГНСС, СЛД и РСДБ) [Petrov et al., 2001], а также сценарные оценки PGA, полученные с применением современных GMPE. Работа не ставит целью построение самостоятельной схемы PSHA/ОСР, а рассматривает возможности использования современных геодезических данных как независимых кинематических ограничений при интерпретации параметров региональной сейсмической опасности.

Методы исследования

Геодинамический полигон «Симеиз–Кацивели», созданный на базе 22-метрового радиотелескопа РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории, представляет собой комплекс высокоточных наземных и космических средств наблюдений для мониторинга современных геодинамических процессов в Крыму, прежде всего на Южном берегу (рис. 1б). Радиотелескоп расположен в районе пос. Симеиз, примерно в 20 км к западу от Ялты.

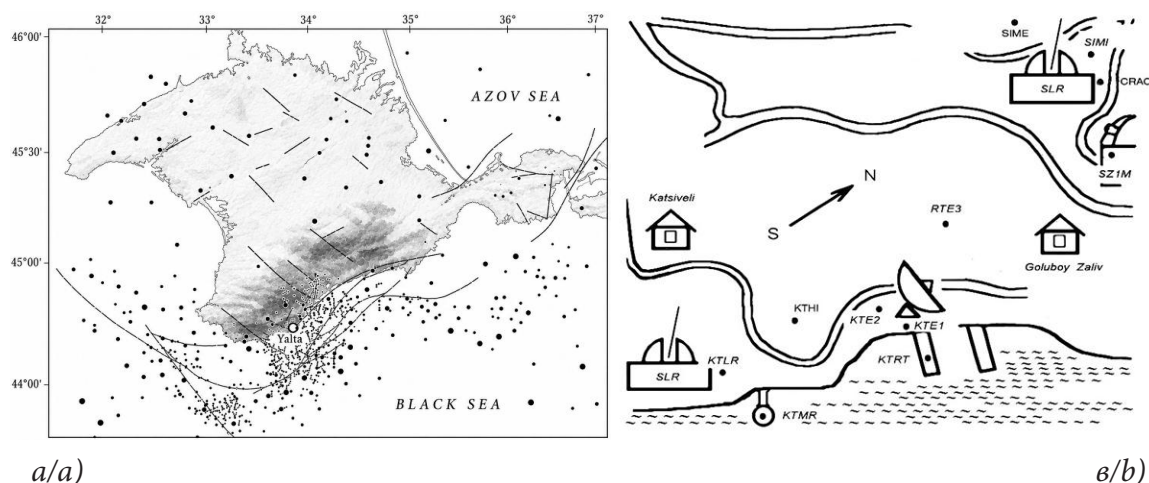


Рис. 1. а) Геолого-географическая схема Крымского региона с эпицентрами землетрясений (1927–2026 гг.) и основными активными разломами, отражающая пространственно-временное распределение сейсмичности и её связь с тектонической структурой. б) Геодинамический полигон «Симеиз–Кацивели» с расположением основных измерительных станций /

Fig. 1. a) Geological and geographic map of the Crimean region with earthquake epicenters (1927–2026) and major active faults, reflecting the spatial and temporal distribution of seismicity and its relationship to the tectonic structure. b) The Simeiz-Katsiveli geodynamic test site with the locations of the main measuring stations

Основу исследований составляют методы космической геодезии: радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ), глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) и лазерная локация спутников (ЛЛС). Дополнительно использовались данные магнитовариационных и наклономерных станций. Комплексное применение этих методов обеспечивает миллиметровую точность определения координат и позволяет оценивать современные горизонтальные и вертикальные движения земной коры в международной системе отсчёта ITRF.

На полигоне выполняются многолетние регулярные наблюдения в кооперации с международными службами РСДБ, ЛЛС и ГНСС, включая радиоинтерферометрические сеансы с участием станции РТ-22, непрерывные решения для ГНСС-станций “CRAO” и “Katsively”, а также лазерные наблюдения на станциях “Simeiz-1873” и “Katsively-1893” [Volvach et al., 2026].

Для анализа временной структуры деформационных сигналов использовались методы спектрального и вейвлет-анализа, позволяющие исследовать эволюцию частотно-временных характеристик многолетних рядов наблюдений.

В работе использован сводный каталог землетрясений Крымского региона по данным USGS и ISC-GEM за период 1919 – февраль 2026 гг. Магнитуды приведены к шкале моментной магнитуды M_w . В анализ включены события с $M \geq 2.5$. Для различных временных интервалов отдельно оценивалась магнитуда полноты каталога M_c .

Методическая основа исследования включает анализ повторяемости землетрясений по закону Гутенберга–Рихтера, оценку параметра b методом максимального правдоподобия, применение пуассоновской модели для оценки долгосрочной вероятности возникновения событий, а также расчёт параметров сильных движений грунта с использованием современных GMPE для мелкофокусных коровых землетрясений.

Пуассоновская модель использовалась как инженерное приближение и не учитывает возможную временную кластеризацию сейсмичности (например, афтершоковые последовательности или активные периоды типа событий 1927 г.). Основные ограничения исследования связаны с неполнотой раннего каталога, ограниченностью данных о локальной разломной структуре и использованием упрощённой модели распределения событий во времени.

Комплексное использование сейсмологических и геодезических данных позволило сопоставить параметры современной деформации земной коры с характеристиками сейсмического режима и получить дополнительные ограничения на уровень накопления тектонических напряжений в регионе. Геодезические данные рассматриваются как независимые кинематические ограничения и не используются для строгого количественного strain-based PSHA-моделирования.

Результаты

Результаты обработки геодезических измерений

На основе комплексного анализа данных геодинимического полигона «Симеиз–Кацивели» получены оценки абсолютных и относительных скоростей движения Крымского полуострова, а также проанализированы временные изменения северной, восточной и вертикальной компонент координат станций космической геодезии. Для определения долговременных кинематических характеристик использованы РСДБ-наблюдения 1979–2024 гг., включающие около 6 млн измерений групповых задержек [Petrov et al., 2001]. Обработка данных выполнялась в программном комплексе CALC/SOLVE методом наименьших квадратов с использованием данных более 100 станций глобальной РСДБ-сети и нескольких сотен внегалактических радиоисточников. Дополнительно анализировались многолетние ряды ЛЛС- и ГНСС-наблюдений, что позволило получить согласованные оценки современных скоростей движения пунктов полигона. В системе отсчёта ITRF2020 средняя

абсолютная горизонтальная скорость движения станций составляет 34.2 ± 0.6 мм/год, что соответствует кинематике Евразийской литосферной плиты. В системе отсчёта, связанной со стабильной частью Евразии, остаточная скорость движения Крымского полуострова не превышает 3.5 ± 0.5 мм/год (рис. 2).

Полученные значения указывают на преимущественно внутриплитный характер современных деформаций и отсутствие значительных относительных смещений, характерных для активных межплитных границ. Горизонтальное перемещение имеет преимущественно северо-восточную направленность.

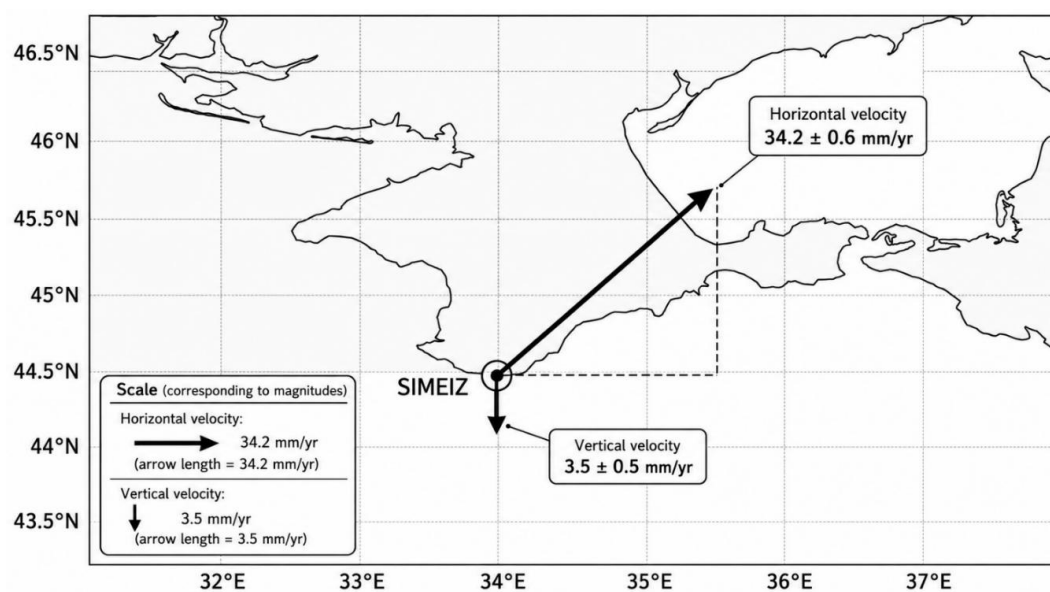


Рис. 2. Современные горизонтальные скорости и вертикальная компонента движения станции «Симеиз» в системе отсчёта ITRF2020 по данным РСДБ, ЛЛС и ГНСС /

Fig. 2. Modern horizontal velocities and vertical component of motion of the Simeiz station in the ITRF2020 reference system based on VLBI, LLS and GNSS data

Вертикальная компонента характеризуется устойчивой тенденцией к опусканию поверхности со скоростью порядка 3–4 мм/год, что, вероятно, связано с совокупным влиянием региональных тектонических и локальных геодинамических процессов.

В целом результаты геодезических наблюдений свидетельствуют о низких скоростях современных деформаций и ограниченных темпах накопления тектонических напряжений в пределах Крымского региона, что может учитываться при оценке его сейсмического потенциала.

Анализ повторяемости землетрясений и параметра b

Повторяемость землетрясений анализировалась на основе закона Гутенберга-Рихтера [Gutenberg, Richter, 1944]: $\log_{10} N(M) = a - b \cdot M$, где $N(M)$ – кумулятивное число землетрясений с магнитудой $\geq M$, параметр (a) характеризует общий уровень сейсмической активности, а параметр (b) отражает относительное соотношение слабых и сильных событий. Оценка параметра (b) выполнялась методом максимального правдоподобия [Aki, 1965]: $b = \frac{\log_{10} e}{\bar{M} - (M_c - \frac{\Delta M}{2})}$, где $\bar{M}$ – средняя магнитуда выборки, M_c – магнитуда полноты каталога, ΔM – шаг дискретизации.

В связи с неоднородностью полноты каталога анализ выполнен отдельно для двух временных интервалов. Граница 1957 г. связана с переходом к устойчивому инструментальному мониторингу и снижением магнитуды полноты каталога с $M_c \approx 4.8$ до $M_c \approx 3.0$.

Для периода 1919–1957 гг. получено значение ($b = 0.63 \pm 0.05$) при ($M_c = 4.8$), что отражает повышенную долю землетрясений средней и высокой магнитуды, связанную с серией событий 1927 г. Для периода 1957–2026 гг. при ($M_c = 3.0$) получено ($b = 1.02 \pm 0.04$), характерное для умеренной внутриплитной сейсмичности без выраженного преобладания сильных событий. Полученные параметры закона Гутенберга–Рихтера приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Параметры закона Гутенберга–Рихтера для двух временных интервалов каталога землетрясений Крымского региона / Gutenberg–Richter parameters for two time intervals of the Crimean earthquake catalog

Период / Period	M_c	a	b	N	Интерпретация / Interpretation
1919–1957	4.8	3.7–3.8	0.63 ± 0.05	15	Повышенная доля землетрясений средней и сильной магнитуды, обусловленная серией событий 1927 г. / Increased proportion of moderate-to-strong earthquakes associated with the 1927 sequence
1957–2026	3.0	4.5–4.6	1.02 ± 0.04	40	Умеренная внутриплитная сейсмичность, преобладание слабых и умеренных событий / Moderate intraplate seismicity dominated by low-to-moderate-magnitude events

Примечание: Приведены значения магнитуды полноты каталога M_c , параметров повторяемости a и b, а также число событий N, использованных при оценке. Разделение каталога на периоды 1919–1957 и 1957–2026 гг. связано с изменением полноты и качества инструментальных наблюдений / Note: The table presents the catalog completeness magnitude M_c , recurrence parameters a and b, and the number of events N used in the estimation. The division into the 1919–1957 and 1957–2026 intervals reflects changes in catalog completeness and instrumental data quality.

Здесь N – число событий с магнитудами $M \geq M_c$, использованных при оценке параметров. Несмотря на относительно небольшую статистику, особенно для раннего периода, различия между двумя интервалами отражают переход от режима повышенной концентрации сильных событий к современной умеренной внутриплитной сейсмичности, что согласуется с результатами геодезических наблюдений.

Геодинамические условия и их связь с сейсмической опасностью

Период 1919–1927 гг. характеризуется максимальной сейсмической активностью за весь инструментально-исторический этап наблюдений в Крымском регионе. В этот интервал произошла серия сильных землетрясений с моментными магнитудами до $M_w \approx 6.9$, известная как Крымская сейсмическая серия 1927 года.

Наиболее сильное событие произошло 11 сентября 1927 г. ($M_w \approx 6.9$) в акватории Чёрного моря к югу от Южного берега Крыма. В сентябре 1927 г. зарегистрировано более десяти событий с $M_w > 5.0$, что указывает на активизацию протяжённой разломной зоны. Значимые события также произошли 26 июня 1927 г. ($M_w \approx 6.0$), а также 12 и 14 сентября ($M_w = 5.2–6.1$). Эпицентры локализованы преимущественно вдоль Южнобережной зоны субширотного простирания, соответствующей активным разломам переходной области «континент – Черноморская впадина». Более ранним проявлением активизации региональной сейсмичности может рассматриваться землетрясение 25 декабря 1919 г. ($M_w \approx 5.8$), локализованное в акватории Чёрного моря.

Пространственно-временное распределение событий 1919–1927 гг. демонстрирует выраженную кластеризацию сейсмичности, проявляющуюся во временной сгруппированности сильных землетрясений в пределах ограниченного сегмента Южного

берега Крыма и повышенной плотности эпицентров в зоне активизации единой разломной структуры.

Полученные результаты согласуются с данными геодезических наблюдений полигона «Симеиз–Кацивели», показывающими низкие относительные скорости движения Крыма относительно стабильной части Евразии ($\approx 3\text{--}4$ мм/год) при абсолютной скорости порядка 34 мм/год в глобальной системе отсчёта. Это соответствует преимущественно внутриплитному характеру современной тектонической активности региона, при котором сильные землетрясения происходят сравнительно редко, но могут представлять существенную сейсмическую опасность.

Максимально возможная магнитуда

Оценка предельных магнитудных характеристик региона выполнена на основе комплекса геодинамических, геометрических и сейсмологических ограничений. Геодезические данные рассматриваются как независимые кинематические ограничения, позволяющие оценить реалистичность диапазонов $M_{\max}$ и параметров повторяемости сильных событий.

Согласно результатам РСДБ-наблюдений станции «Симеиз» в составе глобальной сети, обработка около 6 млн измерений за 1994–2024 гг. с использованием комплекса CALC/SOLVE позволила получить устойчивые оценки современных движений станции в системе ITRF2020 [Petrov et al., 2001]. Основная компонента движения соответствует кинематике Евразийской литосферной плиты, тогда как внутриплитные деформации Южного берега Крыма характеризуются существенно меньшими величинами и соответствуют режиму слабой распределённой деформации. Дополнительные ограничения следуют из анализа вертикальных движений, показывающих преобладание отрицательных скоростей порядка нескольких миллиметров в год.

Крымский полуостров расположен на южной окраине Евразийской плиты в зоне влияния напряжений, связанных со взаимодействием Евразийской, Африканской и Аравийской плит, а также западным движением Анатолийского блока. В пределах региона эти процессы проявляются в виде слабых распределённых внутриплитных деформаций без формирования устойчивых зон концентрации скоростей.

Максимальное историческое событие региона связано с Крымской сейсмической серией 1927 г. с магнитудами до $M_w \approx 6.9$ (Никонов, 2000; Di Giacomo et al., 2018). Оценка максимально возможной магнитуды выполнена с учётом: (1) исторического максимума; (2) геометрии потенциально активных разломных сегментов длиной порядка 40–70 км; (3) современных скоростей деформаций и внутриплитного геодинамического режима [Wells, Coppersmith, 1994; Scholz, 2019].

Количественная оценка сопоставлялась с эмпирическими соотношениями между магнитудой и длиной разрыва [Wells, Coppersmith, 1994]: $M = a + b \cdot \log L$, где L – длина потенциально активного разломного сегмента. Для структур Южного берега Крыма ($L \approx 40\text{--}70$ км) получаем диапазон $M_w \approx 6.5\text{--}6.9$, согласующийся с параметрами событий 1927 г. Дополнительным ограничением служат современные относительные скорости деформаций порядка 3–4 мм/год, определённые по данным РСДБ, ЛЛС и ГНСС.

Низкие скорости современных деформаций соответствуют ограниченному темпам накопления тектонических напряжений и умеренному сейсмическому потенциалу региона. Неопределённость оценки $M_{\max}$ связана с ограниченной длительностью инструментального каталога, неполной определённой геометрии активных разломов и эпистемической неопределённостью эмпирических соотношений.

С учётом параметров Крымской серии 1927 г., размеров предполагаемых активных разломных структур и современных скоростей деформаций в качестве инженерной оценки для региона принят диапазон $M_{\max} \approx 6.8 \pm 0.2$. События с магнитудами

$M \geq 7.0$ в рамках рассматриваемой модели представляются маловероятными. Полученная оценка носит инженерно-геодинамический и полуэмпирический характер и не заменяет специализированных процедур определения $M_{\max}$ в рамках полного вероятностного сейсмического районирования.

Частота сильных землетрясений

Для землетрясений с магнитудой $M \geq 6.5$ средняя частота повторяемости оценена как верхняя инженерная граница $\lambda_{6.5} \approx (6-8) \times 10^{-3} \text{ год}^{-1}$. Оценка учитывает вклад кластеризованной Крымской сейсмической серии 1927 г. и рассматривается как консервативная характеристика, используемая при оценке вероятностной сейсмической опасности. Соответствующий средний интервал повторяемости составляет 125–170 лет.

Вероятность превышения в течение периода T вычислялась в предположении стационарного пуассоновского процесса: $P(T) = 1 - e^{-\lambda T}$ [Cornell, 1968; McGuire, 2004; Gutenberg, Richter, 1944]. Для событий $M \geq 6.5$ получены следующие оценки вероятности превышения: 10 лет – 6–8 %; 30 лет – 16–21 %; 50 лет – 26–33 %.

Сценарные значения пиковых ускорений грунта (PGA) рассчитаны с использованием современных эмпирических зависимостей затухания (GMPE) для мелкофокусных коровых землетрясений активных континентальных областей [Boore et al., 2014; Campbell, Bozorgnia, 2014]. Дополнительное сопоставление с региональными GMPE для Крымско-Черноморского региона показало согласованность результатов в пределах эпистемической неопределённости моделей. Расчёты выполнены для гипоцентральных расстояний, соответствующих потенциальным сейсмогенерирующим зонам Южного берега Крыма и прилегающей акватории Чёрного моря.

Для сценария $M = 6.5$ в районе Ялты медианные значения PGA составляют 0.25–0.40 g, а для предельного сценария $M = 7.0$ возрастают до 0.45–0.65 g. Для района Севастополя соответствующие оценки ниже: 0.08–0.15 g ($M = 6.5$) и 0.18–0.30 g ($M = 7.0$), что связано с большими расстояниями до потенциальных очаговых зон и особенностями региональной тектонической структуры.

Условная годовая интенсивность превышения уровня $\text{PGA} > 0.3 \text{ g}$ для района Ялты оценивается как $\lambda_{0.3g} \approx 3.5 \times 10^{-3} \text{ год}^{-1}$, что соответствует вероятности около 16 % за 50 лет в рамках стационарной пуассоновской модели. Для района Севастополя вероятность превышения не превышает 5 % и определяется редкими экстремальными сценариями.

Представленные значения PGA соответствуют медианным оценкам; суммарная эпистемическая и алеаторная неопределённость составляет порядка $\pm 30-50 \%$. С учётом неопределённости параметров повторяемости диапазон $\lambda_{6.5} = (0.005-0.015) \text{ год}^{-1}$ приводит к вариации вероятности превышения $\text{PGA} > 0.3 \text{ g}$ за 50 лет от 6 до 18 %. Верхняя граница соответствует консервативному сценарию, тогда как более низкие значения согласуются с внутриплитным характером деформаций Крымского региона и низкими скоростями накопления тектонических напряжений.

Дискуссия

Сопоставление Южного берега Крыма с другими сейсмоактивными регионами Европы – Большим Кавказом, Балканами и зоной Вранча – показывает его принадлежность к областям умеренной внутриплитной сейсмичности. В отличие от Кавказа и Восточного Средиземноморья, где реализуются высокие скорости деформаций и протяжённые активные разломы [Reilinger et al., 2006; Mosar et al., 2022], Крымский регион характеризуется малыми относительными скоростями современных движений ($\approx 3-4 \text{ мм/год}$), отсутствием субдукции и ограниченными размерами активных разломных структур.

Полученные оценки согласуются с существующими сейсмотектоническими моделями региона [Пустовитенко и др., 1989; Sosson et al., 2017; Nikishin et al., 2015]. Оценка максимально возможной магнитуды $M_{\max} \approx 6.8 \pm 0.2$ соответствует параметрам Крымской серии 1927 г., геометрии активных разломов и современным геодинамическим ограничениям. Отсутствие крупных трансформных и субдукционных структур естественным образом ограничивает размеры возможных очаговых зон и верхний уровень реализуемых магнитуд.

Значения параметра b закона Гутенберга–Рихтера для инструментального периода ($b \approx 1.0$) типичны для слабodeформируемых внутриплитных областей. Более низкие значения для периода 1919–1957 гг. ($b \approx 0.6$) отражают влияние кластеризованной Крымской серии 1927 г. и повышенную долю сильных событий.

Интеграция данных РСДБ, ЛЛС и ГНСС позволяет использовать современные скорости деформаций как независимые кинематические ограничения при интерпретации параметров сейсмической опасности. Низкие скорости относительных движений согласуются с ограниченными темпами накопления тектонических напряжений и умеренным сейсмическим потенциалом региона.

Полученные результаты не противоречат существующим схемам ОСР Крыма и могут использоваться как дополнительный геодинамический контекст при уточнении региональных моделей сейсмической опасности. Несмотря на умеренный уровень современной сейсмичности, сочетание активных разломов, прибрежной урбанизации и инженерно-геологической уязвимости определяет значимость оценки возможных сильных землетрясений для Южного берега Крыма.

Выводы

В работе рассмотрены геодинамические ограничения параметров сейсмической опасности Крымского полуострова на основе совместного анализа сейсмологических и современных геодезических данных. Обработка РСДБ-, ЛЛС- и GNSS-наблюдений в системе ITRF2020 позволила уточнить современные кинематические характеристики региона. Абсолютная горизонтальная скорость движения составляет 34.2 ± 0.6 мм/год, тогда как относительная скорость относительно стабильной Евразии не превышает 3.5 ± 0.5 мм/год, что соответствует внутриплитному режиму деформаций.

Низкие относительные скорости ($\approx 3\text{--}4$ мм/год) и отсутствие выраженной локализации деформаций согласуются с ограниченной протяжённостью активных разломных структур и умеренным уровнем накопления тектонических напряжений.

Анализ закона Гутенберга–Рихтера показал значения параметра $b \approx 1.0$ для инструментального периода ($M_c = 3.0$), характерные для слабodeформируемых внутриплитных областей. Пониженные значения $b \approx 0.6$ для первой половины XX века связаны с кластеризацией событий Крымской серии 1927 г.

На основе сейсмологических, геометрических и геодинамических ограничений получена оценка максимально возможной магнитуды $M_{\max} \approx 6.8 \pm 0.2$. Для инженерных сценариев рассмотрен предельный вариант $M = 7.0$. Средняя частота событий с $M \geq 6.5$ оценивается как $\lambda_{6.5} \approx (6\text{--}8) \times 10^{-3}$ год $^{-1}$, что соответствует вероятности 26–33 % за 50 лет в рамках пуассоновской модели.

Полученные результаты показывают, что Южный берег Крыма относится к регионам умеренной сейсмической опасности, однако сочетание активных разломов, прибрежной урбанизации и инженерно-геологической уязвимости может приводить к существенным локальным последствиям сильных землетрясений.

Представленные оценки не являются самостоятельной схемой вероятностного сейсмического районирования и рассматриваются как дополнительные геодинамические ограничения при интерпретации параметров региональной сейсмической опасности.

Литература

1. Никонов А.А. Сейсмический потенциал Крымского региона: Сравнение региональных карт и параметров выявленных событий // *Физика Земли*. – 2000. – № 7. – С. 53–62.
2. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Горячун А.В. Землетрясения Крымско-Черноморского региона. Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.
3. Свалова В.Б. Геотермия и сейсмичность Кавказского региона и обратная задача геодинамики // *Геология и геофизика Юга России*. – 2019. – Т. 9. № 3. – С. 8–29. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36414.
4. Сим Л.А., Гордеев Н.А., Сычева Н.А. Неотектоника и современные напряжения Степного Крыма // *Геосистемы переходных зон*. – 2025. – Т. 9. № 4. – С. 345–360. DOI: 10.30730/grtz.2025.9.4.345-360.
5. Aki K. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits // *Bulletin of the Earthquake Research Institute*. – 1965. – No. 43. – pp. 237–239.
6. Akkar S., Bommer J.J. Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East // *Seismological Research Letters*. – 2010. – No. 81(2). – pp. 195–206. DOI: 10.1785/gssrl.81.2.195.
7. Altamimi Z., Rebischung P., Collilieux X., Metivier L., Chanard K. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions // *Journal of Geodesy*. – 2023. – No. 97. – Art. No. 47. DOI: 10.1007/s00190-023-01738-w.
8. Boore D.M., Stewart J.P., Seyhan E., Atkinson G.M. NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5 % damped PSA for shallow crustal earthquakes // *Earthquake Spectra*. – 2014. – No. 30(3). – pp. 1057–1085. DOI: 10.1193/070113EQS184M.
9. Campbell K.W., Bozorgnia Y. NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5 % damped spectral response // *Earthquake Spectra*. – 2014. – No. 30(3). – pp. 1087–1115. DOI: 10.1193/062913EQS175M.
10. Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1968. – No. 58(5). – pp. 1583–1606. DOI: 10.1785/BSSA0580051583.
11. Di Giacomo D., Engdahl E.R., Storchak D.A. The ISC-GEM Earthquake Catalogue (1904–2014): status after the extension project // *Earth System Science Data*. – 2018. – No. 10. – pp. 1877–1899. DOI: 10.5194/essd-10-1877-2018.
12. Gutenberg B., Richter C.F. Frequency of earthquakes in California // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1944. – No. 34(4). – pp. 185–188. DOI: 10.1785/BSSA0340040185.
13. Nikishin A.M., Wannier M. et al. Mesozoic to recent geological history of southern Crimea and the Eastern Black Sea region. In: Sosson M., Stephenson R.A., Adamia S.A. (eds). *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus*. Geological Society, London, Special Publications, 428. 2015. – pp. 1–XX. DOI: 10.1144/SP428.1.
14. Kondorskaya N.V., Shebalin N.V. New Catalogue of the strong earthquakes of the USSR from ancient times through 1977 // *World Data Center A*. Colorado, USA, – 1982.
15. Kreemer C., Blewitt G., Klein E.C. A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2014. – No. 15. – pp. 3849–3889. DOI: 10.1002/2014GC005407
16. McGuire R.K. Seismic hazard and risk analysis // Oakland, California: Earthquake Engineering Research Institute (EERI), 2004. – 240 p.
17. Mosar J., Mauvilly J., Koiava K., Gamkrelidze I., Enna N., Lavrishev V., Kalberguenova V. Tectonics in the Greater Caucasus (Georgia – Russia): From an intracontinental rifted basin to a doubly verging fold-and-thrust belt // *Marine and Petroleum Geology*. – 2022. – No. 140. – Art. No. 105630. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.105630.
18. Petrov L., Volvach A., Nesterov N. Measurements of horizontal motion of the station Simeiz using VLBI // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. – 2001. – No. 17(5). – pp. 424–436.
19. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R. et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa–Arabia–Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions // *Journal of Geophysical Research*. – 2006. – No. 111. – B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051.

20. Scholz C.H. The mechanics of earthquakes and faulting. 3rd Edition. Cambridge U.: Press. Cambridge, 2019. – 493 p. DOI: 10.1017/9781316681473.
21. Sosson M., Stephenson R.A., Adamia S.A. (eds). Tectonic evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus. Geological Society. London, Special Publications. – 2017. – Vol. 428. – pp. 1–9. DOI: 10.1144/SP428.16.
22. Volvach A.E., Dmitrotsa A.I., Neyachenko D.I. Geodetic constraints on the seismic potential of the Crimean Peninsula // Infocommunications and Radio Technologies. – 2026. – Vol. 9(3). – pp. 397–416. DOI: 10.21227/35ys-cc94.
23. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and displacement // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1994. – No. 84. – pp. 974–1002.

References

1. Nikonov A.A. Seismic potential of the Crimean Region: comparison of regional maps and parameters of detected events. Physics of the Earth. 2000. No. 7. pp. 53–62. (In Russ.)
2. Pustovitenko B.G., Kulchitsky V.E., Goryachun A.V. Earthquakes of the Crimean-Black Sea Region. Kiev. Naukova Dumka. 1989. 192 p. (In Russ.)
3. Svalova V.B. Geothermics and seismicity of the Caucasus region and inverse problem of geodynamics. Geology and Geophysics of Russian South. 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 77–93. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36485. (In Russ.)
4. Sim L.A., Gordeev N.A., Sycheva N.A. Neotectonics and modern stress field of the Steppe Crimea. Geosystems of Transitional Zones. 2025. Vol. 9. No. 4. pp. 1–18. DOI: 10.30730/gtrz.2025.9.4.345-360. (In Russ.)
5. Aki K. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. Bulletin of the Earthquake Research Institute. 1965. No. 43. pp. 237–239.
6. Akkar S., Bommer J.J. Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East. Seismological Research Letters. 2010. No. 81(2). pp. 195–206. DOI: 10.1785/gssrl.81.2.195.
7. Altamimi Z., Rebischung P., Collilieux X., Metivier L., Chanard K. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions. Journal of Geodesy. 2023. No. 97. Art. No. 47. DOI: 10.1007/s00190-023-01738-w.
8. Boore D.M., Stewart J.P., Seyhan E., Atkinson G.M. NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5 % damped PSA for shallow crustal earthquakes. Earthquake Spectra. 2014. No. 30(3). pp. 1057–1085. DOI: 10.1193/070113EQS184M.
9. Campbell K.W., Bozorgnia Y. NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5 % damped spectral response. Earthquake Spectra. 2014. No. 30(3). pp. 1087–1115. DOI: 10.1193/062913EQS175M.
10. Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis. Bulletin of the Seismological Society of America. 1968. No. 58(5). pp. 1583–1606. DOI: 10.1785/BSSA0580051583.
11. Di Giacomo D., Engdahl E.R., Storchak D.A. The ISC-GEM Earthquake Catalogue (1904–2014): status after the extension project. Earth System Science Data. 2018. No. 10. pp. 1877–1899. DOI: 10.5194/essd-10-1877-2018.
12. Gutenberg B., Richter C.F. Frequency of earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America. 1944. No. 34(4). pp. 185–188. DOI: 10.1785/BSSA0340040185.
13. Nikishin A.M., Wannier M. et al. Mesozoic to recent geological history of southern Crimea and the Eastern Black Sea region. In: Sosson M., Stephenson R.A., Adamia S.A. (eds). Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus. Geological Society, London, Special Publications, 428. 2015. pp. 1–XX. DOI: 10.1144/SP428.1.
14. Kondorskaya N.V., Shebalin N.V. New Catalogue of the strong earthquakes of the USSR from ancient times through 1977. World Data Center A. Colorado. USA. 1982.
15. Kreemer C., Blewitt G., Klein E.C. A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model. Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2014. No. 15. pp. 3849–3889. DOI: 10.1002/2014GC005407
16. McGuire R.K. Seismic hazard and risk analysis. Oakland, California. Earthquake Engineering Research Institute (EERI). 2004. 240 p.

17. Mosar J., Mauvilly J., Koiava K., Gamkrelidze I., Enna N., Lavrishev V., Kalberguenova V. Tectonics in the Greater Caucasus (Georgia – Russia): From an intracontinental rifted basin to a doubly verging fold-and-thrust belt. *Marine and Petroleum Geology*. 2022. No. 140. Art. No. 105630. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.105630.
18. Petrov L., Volvach A., Nesterov N. Measurements of horizontal motion of the station Simeiz using VLBI. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2001. No. 17(5). pp. 424–436.
19. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R. et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa–Arabia–Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research*. 2006. No. 111. B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051.
20. Scholz C.H. *The mechanics of earthquakes and faulting*. 3rd Edition. Cambridge U. Press. Cambridge. 2019. 493 p. DOI: 10.1017/9781316681473.
21. Sosson M., Stephenson R.A., Adamia S.A. (eds). *Tectonic evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus*. Geological Society. London. Special Publications. 2017. Vol. 428. pp. 1–9. DOI: 10.1144/SP428.16.
22. Volvach A.E., Dmitrotsa A.I., Neyachenko D.I. Geodetic Constraints on the Seismic Potential of the Crimean Peninsula. *Infocommunications and Radio Technologies*. 2026. Vol. 9(3). pp. 397–416. DOI: 10.21227/35ys-cc94.
23. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994. No. 84. pp. 974–1002.

УДК 550.83:551.435.4

DOI: 10.46698/VNC.2026.51.92.001

Оригинальная статья

Локализация скрытых зон развития опасных геологических процессов в прибрежном клифе городища «Херсонес Таврический» с помощью методов инженерной геофизики

В.В. Глазунов^{1,3}, Д.И. Зеликман¹, Н.Н. Ефимова², А.А. Букатов³

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2, e-mail: s235005@stud.spmi.ru;

² Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Средний пр., 74, e-mail: natafima@mail.ru;

³ Государственный историко-археологический музей-заповедник «Херсонес Таврический», Россия, 299045, г. Севастополь, ул. Древняя, 1, e-mail: bukat@list.ru

Статья поступила: 05.03.2026, доработана: 11.06.2026, принята к публикации: 16.06.2026

Резюме: Актуальность работы. Прибрежные клифы территории городища «Херсонес Таврический» подвержены развитию опасных геологических процессов, приводящих к деградации береговой линии и угрозе сохранности объектов культурно-исторического наследия. Для обоснования мер защиты побережья требуется получение детальной инженерно-геологической информации о строении и состоянии скального массива, а также локализация ослабленных зон, влияющих на устойчивость клифа. Сложные условия объекта исследования, которым является массив берегового клифа, обуславливают необходимость применения комплекса геофизических методов на основе технологии 3D сейсмотомографического прозвучивания. **Целью исследования** является локализация скрытых ослабленных зон в объеме скального массива прибрежного клифа городища «Херсонес Таврический», определяющих развитие опасных геологических процессов. Выполненные комплексные инженерно-геофизические наблюдения включали следующие **методы исследования**: георадиолокационное зондирование, бесконтактную электротомографию и инновационный метод 3D сейсмотомографического прозвучивания. Выполнена инверсия полученных данных и построены карты-срезы и 3D-модели распределения электрического сопротивления и скоростей распространения Р- и S-волн, а также динамических модулей упругости. **Результаты.** По результатам комплексной интерпретации геофизических данных локализованы ослабленные зоны, приуроченные к нарушению бронирующего слоя известняков и развитию трещин отрыва. Установлено пространственное совпадение аномалий, выделенных по данным электротомографии, георадиолокации и сейсмотомографии. Наиболее опасные участки характеризуются пониженными значениями скоростей Р- и S-волн и снижением динамических модулей упругости, что представляет угрозу устойчивости клифа и расположенных вблизи него сооружений. Показана высокая эффективность методики СТП 3D для исследования береговых клифов и оценки факторов, определяющих их устойчивость.

Ключевые слова: сейсмотомография, сейсмическое прозвучивание, 3D-инверсия, электротомография, георадиолокация, устойчивость берегового клифа, побережье Крыма.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-28-01964, <https://rscf.ru/project/25-28-01964/>.

Для цитирования: Глазунов В.В., Зеликман Д.И., Ефимова Н.Н., Букатов А.А. Локализация скрытых зон развития опасных геологических процессов в прибрежном клифе городища «Херсонес Таврический» с помощью методов инженерной геофизики. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 32–44. DOI: 10.46698/VNC.2026.51.92.001

GEOPHYSICS

DOI: 10.46698/VNC.2026.51.92.001

Original paper

Localization of hidden zones of hazardous geological process development in the coastal cliff of the Chersonesos Taurica Ancient settlement using engineering geophysics methods

V.V. Glazunov^{1, 3}, D.I. Zelikman¹, N.N. Efimova², A.A. Bukatov³

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line Vasilyevsky Ostrov, Saint-Petersburg 199106, Russian Federation, e-mail: s235005@stud.spmi.ru;

² A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, 74 Sredny Pr., Saint-Petersburg 199106, Russian Federation, e-mail: natafima@mail.ru;

³ The State Museum-Preserve “Tauric Chersonese”, 1 Drevnaya Str., Sevastopol 299045, Russian Federation, e-mail: bukat@list.ru

Received: 05.03.2026, revised: 11.06.2026, accepted: 16.06.2026

Abstract. Relevance. The coastal cliffs of the Chersonesos Taurica ancient settlement are subject to the development of hazardous geological processes, leading to coastal degradation and posing a threat to the preservation of cultural and historical heritage sites. Substantiation of coastal protection measures requires detailed engineering-geological information on the structure and condition of the rocky massif, as well as localization of weakened zones affecting cliff stability. The complex conditions of the study object, represented by a coastal cliff rock massif, determine the necessity of applying a set of geophysical methods based on 3D seismic tomographic sounding technology. **The aim** of the study is to localize concealed weakened zones within the rock massif of the coastal cliff of the Chersonesos Taurica ancient settlement that control the development of hazardous geological processes. The conducted integrated engineering-geophysical surveys included the **research methods:** ground-penetrating radar sounding, non-contact electrical resistivity tomography, and the innovative method of 3D seismic tomographic sounding. The acquired data were inverted, and depth slices and 3D models of electrical resistivity distribution, P- and S-wave velocities, and dynamic elastic moduli were constructed. **Results.** Based on the integrated interpretation of geophysical data, weakened zones associated with disruption of the limestone armor layer and the development of detachment cracks were localized. A spatial correspondence of anomalies identified by electrical resistivity tomography, ground-penetrating radar, and seismic tomography was established. The most hazardous areas are characterized by reduced P- and S-wave velocities and decreased dynamic elastic moduli, posing a threat to cliff stability and nearby structures. The high efficiency of the STP 3D methodology for investigating coastal cliffs and assessing the factors controlling their stability is demonstrated.

Keywords: seismic tomography; seismic sounding; 3D inversion; electrical resistivity tomography (ERT); ground-penetrating radar (GPR); coastal cliff stability; Crimean coast.

Acknowledgements: *The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 25-28-01964, <https://rscf.ru/project/25-28-01964/>.*

For citation: Glazunov V.V., Zelikman D.I., Efimova N.N., Bukatov A.A. Localization of hidden zones of hazardous geological process development in the coastal cliff of the Chersonesos Taurica Ancient settlement using engineering geophysics methods. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 32–44. DOI: 10.46698/VNC.2026.51.92.001

Введение

Клифы прибрежной территории городища «Херсонес Таврический» подвержены влиянию опасных геологических процессов, приводящих к утрате объектов культурно-исторического наследия. Для оценки их состояния и проведения защитных мероприятий необходима комплексная инженерно-геологическая информация о строении и физико-механических свойствах скального массива, а также о факторах, определяющих деградацию береговой линии [Marciniak et al., 2021; Sujitapan et al., 2024; Odintsov, Gusev, 2026].

Слоистое строение массива, представленного известняками и глинами различной плотности, пористости и степени трещиноватости, а также неравномерное распределение влажности в слоях известняков, связанное с инфильтрацией атмосферных осадков, обуславливает необходимость применения комплекса методов инженерной геофизики.

Ранее была предложена и апробирована методика 3D сейсмотомографического прозвучивания, предназначенная для объёмной локализации зон пониженных скоростей Р- и S-волн и связанных с ними изменений динамических модулей упругости [Глазунов и др., 2025]. Однако решение прикладной инженерно-геологической задачи – выявление скрытых зон деструкции в специфических условиях берегового клифа – требует привлечения дополнительных независимых геофизических признаков [Шабаров, Куранов, 2023].

Настоящая статья развивает этот подход за счёт комплексной интерпретации данных георадиолокационного зондирования, бесконтактной электротомографии и 3D сейсмотомографического прозвучивания, выполненных по единой сети наблюдений. Комплексная геолого-геофизическая интерпретация на основе построения цифровых моделей широко применяется для уточнения строения и выявления неоднородностей геологической среды [Nefedov et al., 2023; Бабенко и др., 2025; Nosov et al., 2022].

Такое комплексирование позволяет повысить достоверность выделения скрытых зон деструкции за счёт взаимного подтверждения аномалий в различных физических полях [Егоров и др., 2025; Трушко и др., 2024]. Существенную роль в формировании неоднородностей могут играть разрывные нарушения и связанные с ними зоны повышенной трещиноватости и проницаемости, что необходимо учитывать при интерпретации результатов комплексных исследований [Данильев и др., 2024а; Данильев и др., 2024б; Glazunov et al., 2026].

Характеристика объекта исследований

В качестве объекта комплексных геофизических исследований был выбран участок клифа северного побережья городища «Херсонес Таврический», подверженный активной деградации (рис. 1).

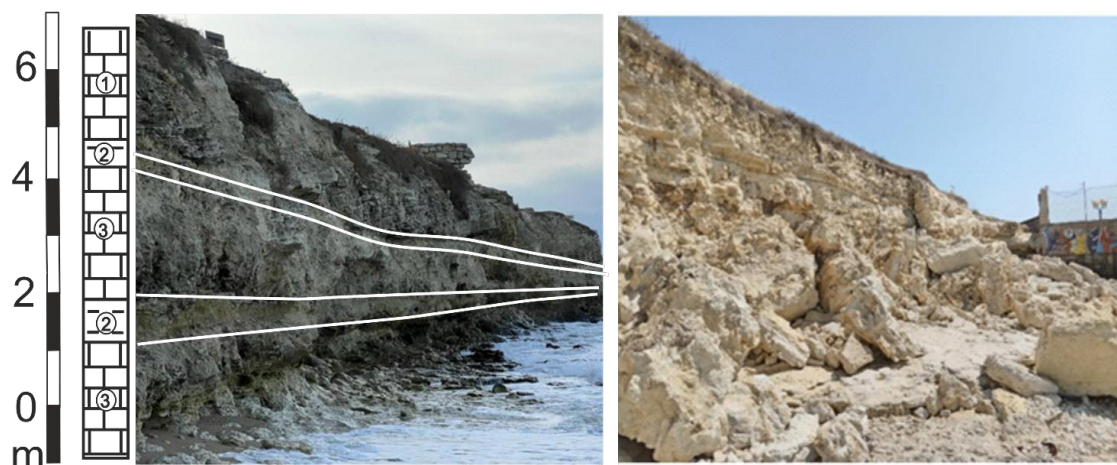


Рис. 1. Стратифицированный геологический разрез абразионного клифа и последствия обрушения в мае 2023 г. Условные обозначения: 1 – известняк скальный; 2 – глина набухающая; 3 – известняк полускальный; белые линии соответствуют литологическим границам [материалы авторов] /

Fig. 1. Stratified geological cross-section of an abrasion cliff and the consequences of the May 2023 collapse. Legend: 1 – rock limestone; 2 – clay; 3 – semi-rock limestone; white lines indicate lithological boundaries [authors' materials]

Геологическое строение клифа сформировано верхнемиоценовыми отложениями, которые представлены породами сарматского яруса среднего горизонта. Толща горных пород сложена в основном хемогенно-органогенными и частично перекристаллизованными известняками с прослоями глин. В слоистой толще, слагающей клиф, наблюдаются трещины и зоны трещиноватости, вероятно, связанные с тектоническими нарушениями (рис. 1).

Глинистые отложения наименее устойчивы к выветриванию, поэтому вдоль них формируются продольные волноприбойные ниши [Ustiugov et al., 2025; Chellamuthu et al., 2026]. Плато, прилегающее к береговому обрыву, сформировано полускальными известняками. Слой этих прочных известняков бронирует скальный массив, надежно защищая его от разрушения [Горячкин, Долотов, 2019].

Ранее оценка состояния клифа в основном опиралась на визуальные наблюдения, что не позволяло выявлять скрытые деформационные изменения в объеме массива. Как отмечается в ряде работ, при оценке оползневой опасности отсутствие информации о внутреннем состоянии массива существенно снижает достоверность прогноза развития деструктивных процессов [Поспехов, Савон-Васиано Юсмира, 2024; Афанасьев и др., 2024].

Факторы деструкции массива можно разделить на три группы: геолого-геоморфологические условия; периодические экзогенные воздействия, включая инфильтрацию осадков и прибойную динамику; быстро развивающиеся процессы, связанные с раскрытием трещин отрыва и обвальным разрушением [Ефремова, Горячкин, 2023; Жерлыгина и др., 2025; Ревазов и др., 2026].

Последние значительные обрушения клифа херсонесского городища произошли около оборонительной Башни 1 Херсонеса в мае 2023 г. (рис. 1). Необходимо отметить, что этот аварийный клиф находится на значительном удалении от уреза воды, то есть обвалы не являются следствием волноприбойной нагрузки.

Дополнительной причиной обвала явилось негативное антропогенное воздействие на скальный массив. В районе плато, прилегающем к башне, бронирующий слой известняка, формирующий его поверхность, был разрушен в античное время. Нарушение слоя прочных известняков привело к интенсификации процесса химической абразии нижерасположенных полускальных пород.

Таким образом, для полноценной оценки аварийного состояния скального массива, наряду с визуальным обследованием поверхности клифа, необходимо получить дополнительную информацию о проявлениях скрытых деструктивных процессов, развивающихся в объеме скального массива.

Методы исследований

Для решения поставленных геологических задач в районе Уваровской базилики были выполнены геофизические съемки методами георадиолокационного зондирования (ГРЛЗ), бесконтактной электротомографии (БЭТ) и сейсмотомографического прозвучивания 3D (СТП 3D) по единой регулярной сети наблюдений (рис. 2).

Профили геофизических съемок проложены параллельно продольным стенам базилики через 2 м. Корректность задания геометрии наблюдений и точность привязки пунктов наблюдения имеют принципиальное значение при проведении сейсморазведочных наблюдений [Hellmann et al., 2023]. Топографическая привязка сети осуществлялась с помощью тахеометра Leica MS-50, методом выноса реперов базовых точек городища в зону проведения работ.

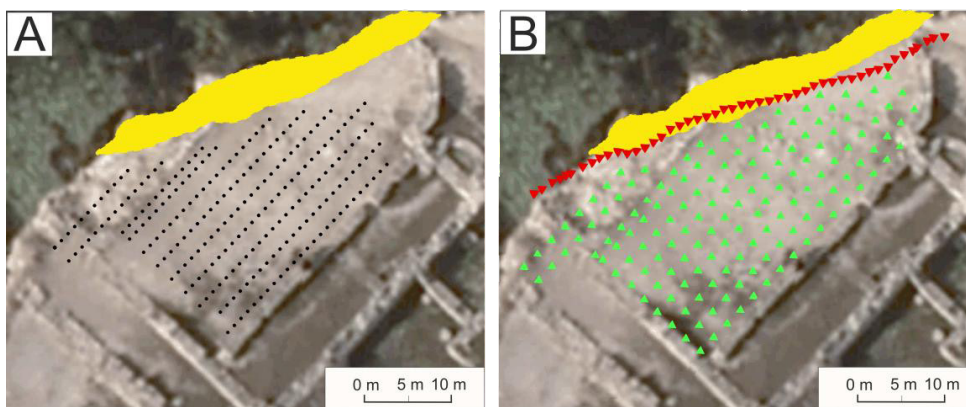


Рис. 2. Сеть электроразведочных (А) и сейсмических (В) наблюдений. Условные обозначения: 1 – обрушившийся участок клифа в период 2002–2021 гг.; 2 – точки наблюдения БЭТ; 3 – сейсμοприемники; 4 – пункты возбуждения сейсмических волн [материалы авторов] /

Fig. 2. Electrical survey (a) and seismic survey (b) observation networks. Legend: 1 – cliff section that collapsed during the period from 2002 to 2021; 2 – NERT observation points; 3 – seismic receivers; 4 – seismic source points [authors' materials]

Георадарная съемка. В рамках комплексного обследования клифа данные георадиолокационной съемки рассматриваются как вспомогательный источник для картирования приповерхностной трещиноватости и уточнения геометрии разуплотнённых зон. Тем не менее эффективность метода для решения поставленных задач подтверждается результатами физического моделирования и численного анализа откликов трещин в ГРЛ [Song et al., 2025; Li et al., 2024].

Исследования проведены на участке, примыкающем к обрыву, по серии профилей с расстоянием 1 м. Методика георадарной съемки обеспечила получение непрерывных георадиолокационных разрезов вдоль профилей. Глубина зондирования на поверхности скальных пород на центральных частотах 300 и 500 МГц не превышала 5 м, а на участках, перекрытых слоем суглинков культурного слоя, – 2 м.

Бесконтактная электротомографическая съемка. Возможности применения бесконтактных (неразрушающих) электроразведочных методов постоянного тока для исследования приповерхностной структуры горного массива, в том числе в условиях ограниченного доступа, сложного рельефа и экранированных поверхностей, показаны в ряде работ [Jeong, Nam, 2024].

Электроразведка методом БЭТ позволяет с требуемой степенью детальности изучить слоистость геолого-литологического разреза клифа и обеспечить локализацию известняков различного состава, степени пористости и влажности, а также пропластков глин. Метод обеспечивает картирование зон трещиноватости, в том числе связанных с тектоническими нарушениями массива скальных пород. Однако остатки стен существенно затрудняют выполнение наблюдений этим методом, так как их наличие не позволяет расположить измерительные диполи требуемым образом. Полезным преимуществом этого метода является возможность выполнения съемки на поверхности скальных пород.

Съемка выполнена по 11-ти профилям с шагом наблюдений 1 м. Длина профилей с ПР12 по ПР19, расположенных вблизи уступа, ограничивалась контуром клифа (рис. 3,а). Количество точек наблюдения определялось длиной профиля и размерами измерительной установки.

3D сейсмотомографическое прозвучивание. Современные методы исследования степени деструкции массивов горных пород основаны на использовании активных сейсмических воздействий и анализе параметров распространения упругих волн, в том числе в рамках скважинных, межскважинных и объемных сейсмоакустических исследований, эффективность которых подтверждена в публикациях [Дорохин, 2019].

Сейсмотомографическое объемное прозвучивание скального массива, расположенного в интервале между поверхностью плато и линией волноприбойной ниши клифа, выполнено на основе регистрации проходящих продольных и поперечных сейсмических волн. Сеть сейсмических пунктов возбуждения (ПВ) и приема (ПП) сейсмических волн размещалась на разных высотных уровнях. Пункты ПВ сейсмических волн располагались сверху, на площади Уваровской базилики, а сейсмоприемники ПП – внизу, вдоль основания клифа с шагом 1 м (рис. 2,В).

Результаты исследований

Результаты комплексных геофизических исследований представлены в виде геофизических карт и разрезов, характеризующих пространственное распределение физических свойств в объеме массива горных пород. На картах и разрезах определено положение ослабленных зон и выделены наиболее опасные для устойчивости клифа участки.

Результаты электротомографических исследований методом БЭТ

На электротомографических разрезах проявились слоистая структура геологического разреза и ослабленные зоны в слое известняков (рис. 3).

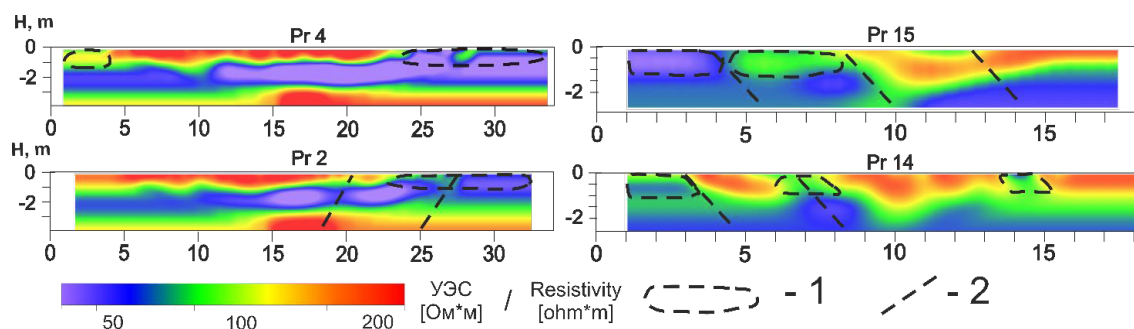


Рис. 3. Характерные электротомографические разрезы по крайевым профилям, расположенным вдоль края обрыва. Условные обозначения: 1 – значительные нарушения слоя; 2 – трещины и зоны трещиноватости [материалы авторов] /

Fig. 3. Representative electrical resistivity tomography (ERT) sections along peripheral profiles, located along the cliff edge. Legend: 1 – significant disturbances in the layer; 2 – cracks and fractured zones [authors' materials]

Высокоомные области на разрезах, окрашенные в красно-желтую цветовую гамму, свойственны слою прочных известняков. Низкоомный слой на разрезах соответствует влажным кавернозным известнякам и глинам (рис. 3). Нарушение верхнего слоя приводит к формированию ослабленных зон в известняковом массиве клифа, по которым происходит инфильтрация атмосферных осадков. На геоэлектрических разрезах вдоль профилей, проложенных на расстоянии 2–5 м от края обрыва, отчетливо проявились локальные зоны, связанные с нарушениями бронирующего слоя известняков (рис. 3). Эти нарушения представляют наибольшую опасность, так как связаны с образованием трещин отрыва, которые могут приводить к обвалам и разрушению клифа.

На электротомографических картах зоны локальных нарушений проявляются в виде локальных и линейно вытянутых аномалий пониженных значений удельных электрических сопротивлений (УЭС) (рис. 4). На карте, линейно вытянутые аномалии контролируют положение формирующихся трещин отрыва, которые выделены пунктирными линиями. Области нарушений слоя глинистых известняков заштрихованы.

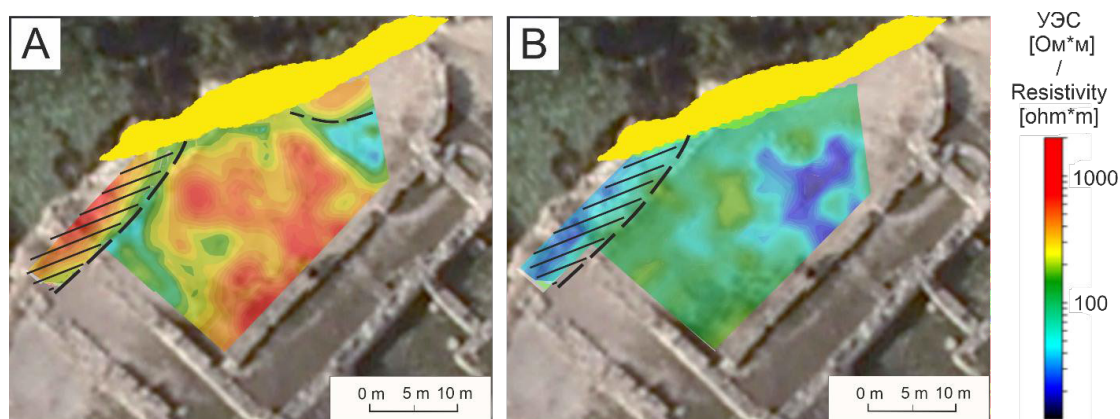


Рис. 4. Локализация формирующейся трещины отрыва (штрихпунктирная линия) и зоны ослабленных скальных известняков (показаны штриховкой) ИГЭ 4 на геоэлектрических картах-срезах глубин 0,5 м (А) и 1,8 м (В) [материалы авторов] /

Fig. 4. Localization of the developing tension crack (dashed line) and the zone of weakened limestone rocks (EGE 4) on geoelectrical depth-slice maps at depths of 0.5 m (A) and 1.8 m (B) [authors' materials]

Материалы, полученные методом БЭТ, позволили локализовать наиболее аварийный участок в пределах Уваровской базилики, на котором в ближайшие годы можно ожидать обвалы клифа (рис. 7).

Результаты георадиолокационных исследований методом ГРЛЗ

В результате анализа динамических и кинематических особенностей волнового электромагнитного поля на георадиолокационных разрезах указаны приповерхностные слои и ослабленные зоны (рис. 5). Границы на разрезах контролируются субгоризонтальными осями синфазности отраженных электромагнитных волн, а зоны деструкции проявляются в виде интенсивных возмущений волнового поля, оконтуренных на разрезе желтой пунктирной линией (рис. 5).

Совместный анализ геоэлектрических и георадиолокационных разрезов показывает, что положение ослабленных зон на электротомографических и георадиолокационных разрезах практически совпадают. Таким образом, данные георадиолокации подтверждают и уточняют выводы, сделанные по данным БЭТ, о локализации сформировавшихся в приповерхностных слоях известняка трещин и зон трещиноватости, угрожающих устойчивости клифа.

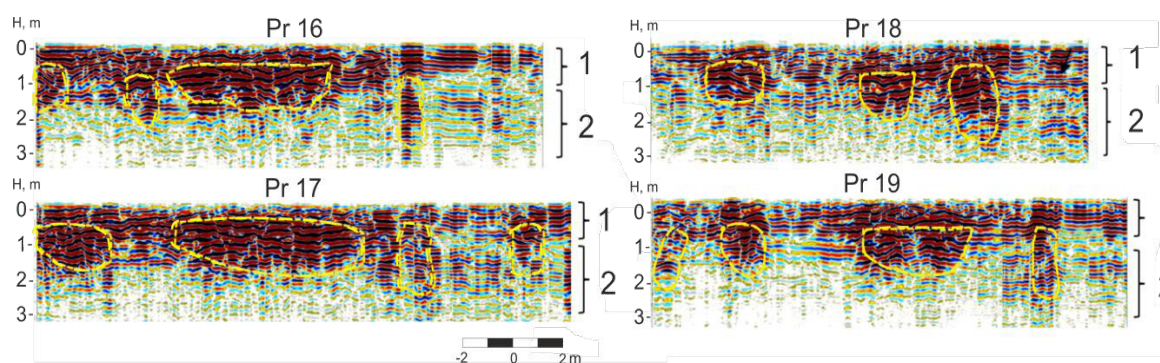


Рис. 5. Георадиолокационные разрезы по профилям Пр16–Пр19 с указанием слоев известняка (1 – бронирующий слой известняков, 2 – известняки малопрочные) и ослабленных, трещиноватых зон массива известняков [материалы авторов] /

Fig. 5. Ground-penetrating radar sections along profiles Pr16–Pr19, indicating limestone layers (1 – protective limestone layer; 2 – low-strength limestone) and weakened, fractured zones within the limestone massif [authors' materials]

Результаты сейсмотомографических исследований методом СТП 3D

По результатам цифровой обработки данных сейсмотомографического прозвучивания с помощью программы “ZondST3d” (ООО «Геодевайс») рассчитаны траектории распространения лучей первых вступлений P- и S-волн, а также синтезированы цифровые 3D-модели распределения скоростей V_p и V_s в объеме скального массива. В качестве примера на рисунке 6 представлены 3D-модель распределения скоростей продольных сейсмических волн и соответствующие траектории распространения лучей первых вступлений P-волн.

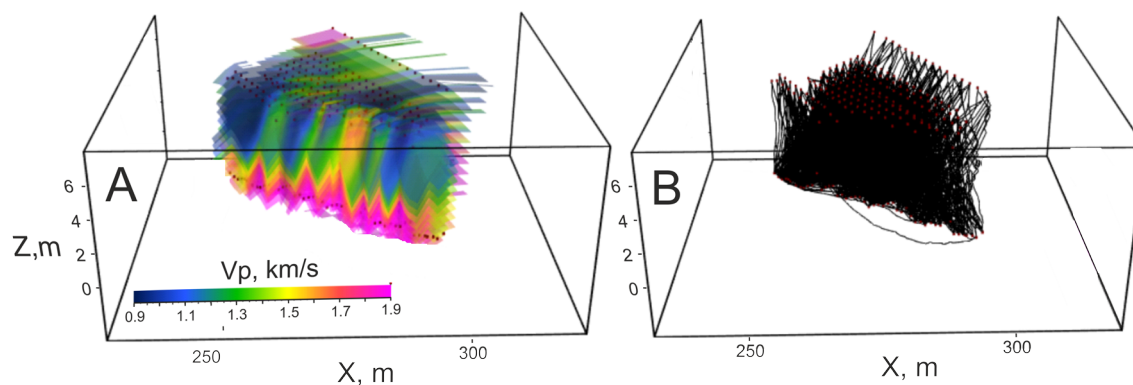


Рис. 6. Синтезированные 3D-модель распределения значений скоростей сейсмических волн V_p в скальном массиве (а) и траектории распространения лучей первых вступлений (б) по данным 3D сейсмотомографического прозвучивания [материалы авторов] /

Fig. 6. 3D model of the distribution of P-wave seismic velocity (V_p) values in the rock mass and first-arrival ray propagation paths synthesized from 3D seismic tomographic sounding data. [authors' materials]

В областях, примыкающих к клифу, образование ослабленных зон связано с воздействием совокупности процессов выветривания. Кроме того, в этих зонах, видимо, активно развивается трещиноватость и начинают формироваться трещины отрыва.

Возможность использования сейсмических методов для изучения состояния массива базируется на взаимосвязи скоростей распространения упругих волн в среде с динамическими модулями Юнга E_d и $E_{деф}$, которые характеризуют прочностные свойства горных пород [Lu et al., 2025].

Для расчета модулей использовались величины скоростей Р- и S-волн, вычисленные по данным **СТП 3D**, а также значения плотности пород, определенные по данным бурения скважин на соседнем участке. Необходимо отметить, что значения $E_{\text{деф}}$, вычисленные по данным сейсмотомографии являются полуколичественными.

Карта-срез, характеризующая распределение модуля общей деформации $E_{\text{деф}}$ для абсолютной отметки 4 м, дает представление об изменениях прочностных свойств известняков верхней части геологического разреза в пределах Уваровской базилики (рис. 7).

На карте-срезе, совмещенной с ортофотопланом территории Уваровской базилики, красной пунктирной линией оконтурены участки, характеризующиеся наиболее низкими значениями $E_{\text{деф}}$. Эти зоны соответствуют ослабленным, наиболее опасным участкам скального массива, расположенным вблизи клифа.

Пунктирная синяя линия характеризует размещение ослабленных зон поверхностного слоя, представленного скальными известняками (рис. 7). Локальные изометрические зоны обусловлены, видимо, антропогенными нарушениями бронирующего слоя, а линейно-вытянутые – воздействием тектонических нарушений, визуально наблюдаемых на поверхности клифа.

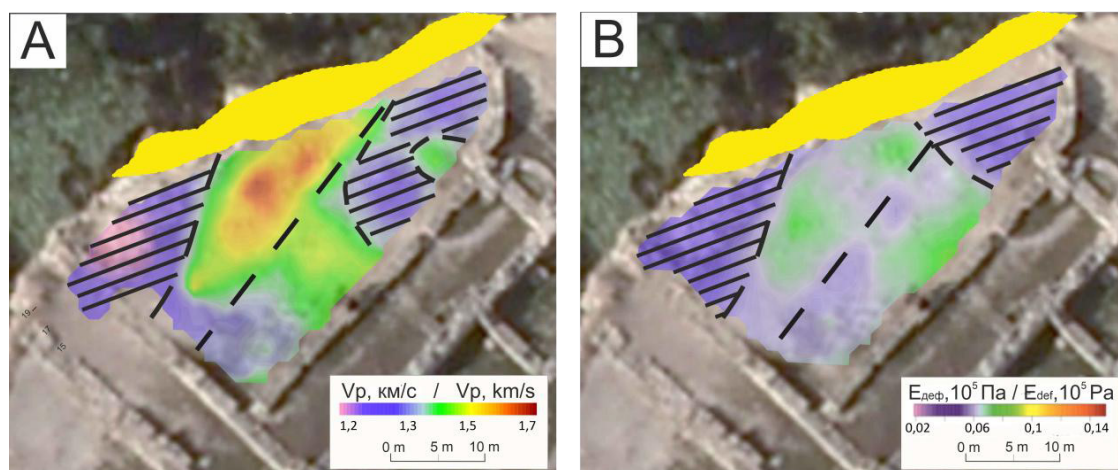


Рис. 7. Локализация ослабленных зон скального массива на картах-срезах изменений скоростей распространения продольных волн V_p (А) и динамического модуля общей деформации $E_{\text{деф}}$ (В) для абсолютной отметки 4 м, совмещенных с ортофотопланом территории Уваровской базилики. Штриховкой показаны ослабленные зоны, черной пунктирной линией – формирующиеся трещины отрыва [материалы авторов] /

Fig. 7. Localization of weakened zones in the rock mass on depth-slice maps of changes in P-wave propagation velocity V_p (A) and dynamic modulus of total deformation E_{def} (B) at the absolute elevation of 4 m, overlain on the orthophotomap of the Uvarov Basilica area. The weakened zones are shown by hatching, and the developing detachment cracks are indicated by a black dashed line [authors' materials]

Выявленные аварийные зоны с наименьшими значениями $E_{\text{деф}}$ угрожают, прежде всего, сохранности апсид центрального и бокового нефов базилики на участках, расположенных в непосредственной близости к обрыву.

Выводы

Результаты комплексных геофизических исследований позволили выделить ослабленные зоны в объеме массива, влияющие на развитие опасных геологических процессов на аварийном участке городища «Херсонес Таврический».

Комплексирование методов повышает однозначность интерпретации геофизических данных и обеспечивает надежность выявления скрытых ослабленных зон в ус-

ловиях сложного строения прибрежного клифа. Совместная интерпретация данных георадиолокационного зондирования, бесконтактной электротомографии и объемного 3D сейсмотомографического прозвучивания позволила выделить зоны деструкции, которые проявляются одновременно в нескольких независимых геофизических параметрах. Пространственное совпадение аномалий подтверждает их связь с нарушениями в структуре массива.

Наиболее опасные участки приурочены к зонам бронирующего слоя известняков и вероятного развития трещин отрыва вблизи края клифа. Эти участки характеризуются пониженными значениями скоростей Р- и S-волн, снижением расчетных динамических модулей деформации, а также аномалиями электрического сопротивления и георадиолокационного поля.

Выявленные ослабленные участки, представляющие повышенную опасность для устойчивости клифа и сохранности Уваровской базилики, требуют мониторинговых наблюдений, а также проведения инженерно-защитных мероприятий.

Установлено, что комплекс методов на основе технологии СТП 3D является эффективным инструментом для исследований береговых клифов. Разработанная методика позволила сформировать детальную объемную модель скального массива, отражающую геологическое строение, состояние и степень развития опасных геологических процессов скального массива клифа.

Литература

1. Афанасьев П.И., Медина С.Я., Савон В.Ю., Картайя П.М., Гарсия де ла Круз М.И. Анализ устойчивости откосов горной дороги месторождения Camarioca Este компании Comandante Ernesto Che Guevara // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 4. – С. 78–84. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-4-78-84.
2. Бабенко И.А., Таловина И.В., Ушаков Д.Е., Крикун Н.С. Пегматиты оазиса Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида: новые полевые геологические и геофизические данные // Записки Горного института. – 2025. – Т. 273. – С. 65–79.
3. Глазунов В.В., Ефимова Н.Н., Зеликман Д.И., Букатов А.А. Локализация зон развития опасных геологических процессов берегового клифа по данным 3D сейсмотомографического прозвучивания // Russian Journal of Earth Sciences. – 2025. – №. 1. – С. 1–12. DOI: 10.2205/2025es000993.
4. Горячкин Ю.Н., Долотов В.В. Морские берега Крыма. Севастополь: ООО «Колорит», 2019. – 256 с.
5. Данильев С.М., Мулев С.Н., Шнюкова О.М. Корреляционно-регрессионный анализ активности естественной электромагнитной и акустической эмиссии в образцах горных пород Октябрьского месторождения // Горный журнал. – 2024а. – № 9. – С. 51–55. DOI: 10.17580/gzh.2024.09.08.
6. Данильев С.М., Секерина Д.Д., Данильева Н.А. Локализация участков развития геомеханических процессов в подземных выработках по результатам трансформационно-классификационного анализа сейсморазведочных данных // Записки Горного института. – 2024б. – Т. 266. – С. 260–271.
7. Дорохин К.А. Опыт применения скважинных сейсмоакустических исследований для оценки фактического состояния массива горных пород с использованием 2D- и 3D-построений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 5. – С. 80–88. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-80-88.
8. Егоров А.С., Агеев А.С., Шуклин И.А., Марков А.Н., Лукин В.В., Горелик Г.Д., Грохотов Е.И. О подобии глубинного строения фундамента и генезиса формирования впадин восточного фланга Восточной Антарктиды и региона озера Байкал // Записки Горного института. – 2025. – Т. 273. – С. 26–41.
9. Ефремова Т.В., Горячкин Ю.Н. Морфодинамика севастопольских бухт под воздействием антропогенной деятельности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2023. – № 1. – С. 31–47. DOI: 10.29039/2413-5577-2023-1-31-47.

10. Жерлыгина Е.С., Куранова М.Е., Гусев В.Н., Одинцов Е.Е. Выявление опасных участков на основе исследования развития техногенных трещин в толще слагающих массив пород // *Горная промышленность*. – 2025. – № 1. – С. 162–169. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-162-169.
11. Поспехов Г.Б., Савон-Васиано Юмира. Оценка оползневой опасности при предварительной разведке месторождений на северо-востоке Кубы // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2024. – № 12-1. – С. 178–192. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_178.
12. 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. – Т. 16. № 1. – С. 217–227. DOI: 10.46698/VNC.2026.28.31.001.
13. Трушко В.Л., Розанов А.О., Саитгалеев М.М., Петров Д.Н., Ильинов М.Д., Карманский Д.А., Селихов А.А. Критерии акустической эмиссии для анализа процесса разрушения горных пород и оценки формирования трещинных коллекторов на больших глубинах // *Записки Горного института*. – 2024. – Т. 269. – С. 848–858.
14. Шабаров А.Н., Куранов А.Д. Основные направления развития горнодобывающей отрасли в усложняющихся горнотехнических условиях ведения горных работ // *Горный журнал*. – 2023. – № 5. – С. 5–10. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.01.
15. Chellamuthu S.N., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P. The role of hydrology in hillslope monitoring and landslide risk mitigation // *Geology and Geophysics of Russian South*. – 2026. – Vol. 16. No. 1. – pp. 80–92. DOI: 10.46698/VNC.2026.14.82.001.
16. Glazunov V.V., Saitgaleev M.M., Sekerina D.D. Features of fracture formation in rock samples under comprehensive compression using acoustic emission // *International Journal of Engineering*. – 2026. – Vol. 39. No. 6. – pp. 1382–1389. DOI: 10.5829/ije.2026.39.06c.07.
17. Hellmann S., Grab M., Patzer C., Bauder A., Maurer H. A borehole trajectory inversion scheme to adjust the measurement geometry for 3D travel-time tomography on glaciers // *Solid Earth*. – 2023. – Vol. 14. – pp. 805–821. DOI: 10.5194/se-14-805-2023.
18. Jeong J., Nam M. Electrical resistivity survey on paved surface and case studies // *The Journal of Engineering Geology*. – 2024. – Vol. 34. No. 2. – pp. 295–315. DOI: 10.9720/kseg.2024.2.295.
19. Li C., Wang H., Wang Y., Wang L., Yang X., Wan X. Recognition of tunnel fracture zones in seismic waves and ground-penetrating radar data // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14. No. 3. – Art. No. 1282. DOI: 10.3390/app14031282.
20. Lu J., Liao X., Rastegarnia A., Qajar J. Estimating UCS of South China sandstones using mineralogical and machine learning approaches // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2025. – Parts A/B/C. Vol. 141. Part 1. – Art. No. 104048. DOI: 10.1016/j.pce.2025.104048.
21. Marciniak A., Kowalczyk S., Gontar T., Owoc B., Nawrot A., Luks B., Cader J., Majdanski M. Integrated geophysical imaging of a mountain landslide – A case study from the Outer Carpathians, Poland // *Journal of Applied Geophysics*. – 2021. – Vol. 191. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104364.
22. Nefedov Yu., Gribanov D., Gasimov E., Peskov D., Han G., Vostrikov N., Pashayeva S. Development of Achimov deposits sedimentation model of one of the West Siberian oil and gas province fields // *Reliability: Theory and Applications*. – 2023. – Vol. 18. Special Issue 5(75). – pp. 441–448. DOI: 10.24412/1932-2321-2023-575-441-448.
23. Nosov V.V., Borovkov A.I., Artyushchenko A.P. Predicting rock bursts in rock mass blocks using acoustic emission // *Resources*. – 2022. – Vol. 11. No. 10. – Art. No. 87. DOI: 10.3390/resources11100087.
24. Odintsov E.E., Gusev V.N. Rock mass condition control by the method of predicting of water-conducting fracture zone parameters for the deposits of polymetallic ores // *International Journal of Engineering. Transactions C: Aspects*. – 2026. – Vol. 39. No. 06. – pp. 1326–1333. DOI: 10.5829/ije.2026.39.06c.02.
25. Song Z., Zheng J., Zhang R., Zhu A., He T., Wang J. The potential of ground penetrating radar in rock fracture detection: insights from physical model tests and numerical simulations // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2025. – Vol. 18. Issue 4. – pp. 2604–2618. DOI: 10.1016/j.jrmge.2025.04.036.

26. Sujitapan C., Kendall J.M., Chambers J.E., Yordkayhun S. Landslide assessment through integrated geoelectrical and seismic methods: A case study in Thungsong site, southern Thailand // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24660.

27. Ustiugov D.L., Pospekhov G.B., Savon-Vaciano Yu., Noa Segura H.L. Determination of groundwater regime in a metal mineral deposit by data mining and spatial interpolation in the central region of the Republic of Cuba // *Eurasian Mining*. – 2025. – No. 1. – pp. 28–33. DOI: 10.17580/em.2025.01.05.

References

1. Afanasiev P.I., Medina S.Ya., Savon V.Yu., Kartaya P. M., Garcia DE.LA.C.M.I. The analysis of slope stability of the mining road of the Camarioca Este deposit of the Comandante Ernesto Che Guevara Company. *Occupational Safety in Industry*. 2024. No. 4. pp. 78–84. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-4-78-84. (In Russ.)

2. Babenko I.A., Talovina I.V., Ushakov D.E., Krikun N.S. Pegmatites of the Larsemann Hills oasis, East Antarctica: new field geological and geophysical data. *Journal of Mining Institute*. 2025. Vol. 273. pp. 65–79. (In Russ.)

3. Glazunov V.V., Efimova N.N., Zelikman D.I., Bukatov A.A. Zones localization of hazardous geological processes habit of the coastal cliff according to 3D seismotomography sounding data. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2025. No. 1. pp. 1–12. DOI: 10.2205/2025es000993. (In Russ.)

4. Goryachkin Yu.N., Dolotov V.V. Sea Coasts of Crimea. Sevastopol. Colorit. 2019. 256 p. (In Russ.)

5. Daniliev S.M., Mulev S.N., Shnyukova O.M. Correlation and regression analysis of natural electromagnetic and acoustic emission activity in rock samples of the Oktyabrsky deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2024. No. 9. pp. 51–55. DOI: 10.17580/gzh.2024.09.08. (In Russ.)

6. Daniliev S.M., Sekerina D.D., Danilieva N.A. Localization of sites for the development of geomechanical processes in underground workings based on the results of the transformation and classification analysis of seismic data. *Journal of Mining Institute*. 2024. Vol. 266. pp. 260–271. (In Russ.)

7. Dorokhin K.A. Experience of borehole seismic sounding for the assessment of physical state of rock mass using 2D and 3D representations. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019. No. 5. pp. 80–88. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-80-88. (In Russ.)

8. Egorov A.S., Ageev A.S., Shuklin I.A., Markov A.N., Lukin V.V., Gorelik G.D., Grokhotoev E.I. On the similarity of deep structure of the basement and genesis of depressions on the eastern flank of East Antarctic and in Lake Baikal region. *Journal of Mining Institute*. 2025. Vol. 273. pp. 26–41. (In Russ.)

9. Efremova T.V., Goryachkin Yu.N. Morphodynamics of Sevastopol Bays under anthropogenic impact. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*. 2023. No. 1. pp. 31–47. DOI: 10.29039/2413-5577-2023-1-31-47. (In Russ.)

10. Zherlygina E.S., Kuranova M.E., Gusev V.N., Odintsov E.E. Identification of hazardous sites based on studying the development of man-made fractures within the rock mass. *Russian Mining Industry*. 2025. No. 1. pp. 162–169. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-162-169. (In Russ.)

11. Pospekhov G.B., Savon-Vaciano Y. Landslide hazard assessment in preliminary exploration of mineral deposits in north-eastern Cuba. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024. No. 12-1. pp. 178–192. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_178. (In Russ.)

12. Revazov M.O., Melkov D.A., Burdzieva O.G., Arkhireeva I.G. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of mountain reas (Karmadon gorge). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2026. Vol. 16. No. 1. pp. 217–227. DOI: 10.46698/VNC.2026.28.31.001. (In Russ.)

13. Trushko V.L., Rozanov A.O., Saitgaleev M.M., Petrov D.N., Ilinov M.D., Karmanskii D.A., Selikhov A.A. Acoustic emission criteria for analyzing the process of rock destruction and evaluating the formation of fractured reservoirs at great depths. *Journal of Mining Institute*. 2024. Vol. 269. pp. 848–858. (In Russ.)

14. Shabarov A.N., Kuranov A.D. Basic development trends in mining sector in complicating

geotechnical conditions. *Gornyi Zhurnal*. 2023. No. 5. pp. 5–10. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.01. (In Russ.)

15. Chellamuthu S.N., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P. The role of hydrology in hillslope monitoring and landslide risk mitigation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2026. Vol. 16. No. 1. pp. 80–92. DOI: 10.46698/VNC.2026.14.82.001.

16. Glazunov V.V., Saitgaleev M.M., Sekerina D.D. Features of fracture formation in rock samples under comprehensive compression using acoustic emission. *International Journal of Engineering*. 2026. Vol. 39. No. 6. pp. 1382–1389. DOI: 10.5829/ije.2026.39.06c.07.

17. Hellmann S., Grab M., Patzer C., Bauder A., Maurer H. A borehole trajectory inversion scheme to adjust the measurement geometry for 3D travel-time tomography on glaciers. *Solid Earth*. 2023. Vol. 14. pp. 805–821. DOI: 10.5194/se-14-805-2023.

18. Jeong J., Nam M. Electrical resistivity survey on paved surface and case studies. *The Journal of Engineering Geology*. 2024. Vol. 34. No. 2. pp. 295–315. DOI: 10.9720/kseg.2024.2.295.

19. Li C., Wang H., Wang Y., Wang L., Yang X., Wan X. Recognition of tunnel fracture zones in seismic waves and ground-penetrating radar data. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. No. 3. Art. No. 1282. DOI: 10.3390/app14031282.

20. Lu J., Liao X., Rastegarnia A., Qajar J. Estimating UCS of South China sandstones using mineralogical and machine learning approaches. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2025. Parts A/B/C. Vol. 141. Part 1. Art. No. 104048. DOI: 10.1016/j.pce.2025.104048.

21. Marciniak A., Kowalczyk S., Gontar T., Owoc B., Nawrot A., Luks B., Cader J., Majdanski M. Integrated geophysical imaging of a mountain landslide – A case study from the Outer Carpathians, Poland. *Journal of Applied Geophysics*. 2021. Vol. 191. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104364.

22. Nefedov Yu., Gribov D., Gasimov E., Peskov D., Han G., Vostrikov N., Pashayeva S. Development of Achimov deposits sedimentation model of one of the West Siberian oil and gas province fields. *Reliability: Theory and Applications*. 2023. Vol. 18. Special Issue 5(75). pp. 441–448. DOI: 10.24412/1932-2321-2023-575-441-448.

23. Nosov V.V., Borovkov A.I., Artyushchenko A.P. Predicting rock bursts in rock mass blocks using acoustic emission. *Resources*. 2022. Vol. 11. No. 10. Art. No. 87. DOI: 10.3390/resources11100087.

24. Odintsov E.E., Gusev V.N. Rock mass condition control by the method of predicting of water-conducting fracture zone parameters for the deposits of polymetallic ores. *International Journal of Engineering. Transactions C: Aspects*. 2026. Vol. 39. No. 06. pp. 1326–1333. DOI: 10.5829/ije.2026.39.06c.02.

25. Song Z., Zheng J., Zhang R., Zhu A., He T., Wang J. The potential of ground penetrating radar in rock fracture detection: insights from physical model tests and numerical simulations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2025. Vol. 18. Issue 4. pp. 2604–2618. DOI: 10.1016/j.jrmge.2025.04.036.

26. Sujitapan C., Kendall J.M., Chambers J.E., Yordkayhun S. Landslide assessment through integrated geoelectrical and seismic methods: A case study in Thungsong site, southern Thailand. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24660.

27. Ustiugov D.L., Pospekhov G.B., Savon-Vaciano Yu., Noa Segura H.L. Determination of groundwater regime in a metal mineral deposit by data mining and spatial interpolation in the central region of the Republic of Cuba. *Eurasian Mining*. 2025. No. 1. pp. 28–33. DOI: 10.17580/em.2025.01.05.

УДК 622.01

DOI: 10.46698/VNC.2026.36.57.001

Оригинальная статья

Геофизический контроль инновационных технологий разработки рудных месторождений Северной Осетии

В.И. Голик 

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

Статья поступила: 10.03.2026, доработана: 28.05.2026, принята к публикации: 01.06.2026

Резюме: Актуальность проблемы объясняется тем, что рудные месторождения Садонского рудного узла Республики Северная Осетия–Алания не разрабатываются по причине нерентабельности из-за высоких потерь и разубоживания руд при недостаточно управляемых геомеханических процессах разработки. **Методы:** обобщение результатов лабораторных и натурных исследований, систематизация полученных данных, анализ результатов исследований, эксперимент, физическое и математическое моделирование и прогнозирование на инженерном уровне. **Результаты.** Дана справка о системах контроля состояния массива рудовмещающих горных пород при подземной разработке рудных месторождений. Исследованы аспекты утилизации при изготовлении бетонных закладочных смесей отходов добычи и переработки доломита и хвостов переработки руд в рамках единой технологии. Приведены результаты подземного блокового выщелачивания и извлечения металлов из промышленных стоков месторождений Садонского рудного узла. Охарактеризованы основные методы исследования рудовмещающего породного массива при технологическом воздействии на него. Сформирована база данных для создания единой модели взаимодействия природных и технических систем в районах интенсивного и масштабного комплексного освоения недр на примере РСО–Алания. Приведены результаты систематизации экспериментальных данных и анализа динамики геомеханики разрабатываемых рудных запасов, оптимизации механизма управления состоянием разрабатываемого массива с минимизацией потерь и разубоживания руд, а также радикального изменения экологических показателей разработки месторождений технологически вскрываемых руд. Предложена альтернативная традиционной технология выщелачивания металлов, особенность которой состоит в перенесении процессов переработки руд в недра. В качестве основного направления совершенствования добычи металлов рекомендована концепция комплексирования возможностей Садонского свинцово-цинкового комбината и карьера «Доломит», реализация которой может обеспечить функционирование добывающих и перерабатывающих предприятий региона с получением комплексного эколого-экономического и социального эффекта. Материалы исследования представляют интерес для разработки технологически вскрываемых твердых полезных ископаемых и могут быть востребованы при модернизации действующих и строительстве новых предприятий, а также для подготовки специалистов высшей категории.

Ключевые слова: месторождение, рудовмещающий массив, разработка, технология, техногенное воздействие, геомеханика, напряжения, деформации, геофизика.

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию Геофизического института ВНЦ РАН, рег. № НИОКТР 125022802998-8.

Для цитирования: Голик В.И. Геофизический контроль инновационных технологий разработки рудных месторождений Северной Осетии. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 45–56. DOI: 10.46698/VNC.2026.36.57.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.36.57.001

Original paper

Geophysical monitoring of innovative technologies for the development of ore deposits in North Ossetia

V.I. Golik 

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation,
e-mail: v.i.golik@mail.ru

Received: 10.03.2026, revised: 28.05.2026, accepted: 01.06.2026

Abstract: The relevance of this research is explained by the fact that the ore deposits of the Sadon ore cluster in the Republic of North Ossetia–Alania are not being mined due to their unprofitability, which stems from high losses and ore depletion caused by poorly controlled geomechanical processes during mining. **Methods:** generalization of laboratory and field study results, systematization of the obtained data, analysis of research results, experimentation, physical and mathematical modeling, and engineering-level forecasting. **Results.** Information is provided on systems for monitoring the condition of ore-bearing rock masses during underground mining of ore deposits. Aspects of utilizing dolomite mining and processing waste and ore processing tailings in the production of concrete grouting mixtures within a unified technology have been investigated. Results of underground block leaching and metal extraction from industrial effluents of the Sadon ore cluster deposits are presented. The main methods for studying the ore-bearing rock mass under technological impact are characterized. A database has been created to develop a unified model of the interaction between natural and technical systems in areas of intensive and large-scale comprehensive subsoil development, using the Republic of North Ossetia–Alania as an example. This study presents the results of a systematic review of experimental data and an analysis of the geomechanical behavior of mined ore reserves, the optimization of a mechanism for managing the condition of the mined rock mass to minimize losses and ore dilution, and a radical improvement in the environmental performance of mining operations for ores that can be extracted using conventional methods. An alternative technology to the traditional one involving metal leaching is proposed, the distinctive feature of which is the transfer of ore processing operations to the subsoil. As the main direction for improving metal extraction, the concept of integrating the capabilities of the Sadon Lead and Zinc Combine and the “Dolomite” quarry is recommended; its implementation can ensure the operation of the region’s mining and processing enterprises while yielding a comprehensive environmental, economic, and social effect. The research materials are of interest for the development of technologically extractable solid minerals and may be in demand for the modernization of existing enterprises and the construction of new ones, as well as for the training of top-level specialists.

Keywords: deposit, ore-bearing massif, development, technology, anthropogenic impact, geomechanics, stresses, deformations, geophysics.

Acknowledgment: *This work was carried out according to the state assignment of the Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, No. 125022802998-8.*

For citation: Golik V.I. Geophysical monitoring of innovative technologies for the development of ore deposits in North Ossetia. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 45–56. DOI: 10.46698/VNC.2026.36.57.001

Введение

Геофизические методы исследований составляют основу при прогнозировании состояния массива в процессе разработки месторождений полезных ископаемых [Заалишвили, Голик, 2024; Голик и др., 2015; Голик, 2025а, б; Golik et al., 2015; Adero et al., 2020].

Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых, применяющие методы рудничной геофизики, описаны в теоретических и практических разработках [Рыбак и др., 2022; Адигамов, Юденков, 2021; Ключев и др., 2020; Agelet de Saracibar, 2022; Голик, Бурдзиева, 2024].

Результаты геофизического контроля позволяют обосновать целесообразность направлений совершенствования геотехнологий путем комплексного использования геофизических методов для прогнозирования свойств породных массивов при технологическом воздействии на них [Батугин и др., 2021; Баловцев и др., 2016; Абрамкин и др., 2022; Liu et al., 2022].

Геофизические приборы и оборудование являются неотъемлемой частью процесса добычи минерального сырья для удовлетворения потребностей промышленности [Ma et al., 2024; Хакулов и др., 2018; Месхи и др., 2017; Di et al., 2023] и обеспечения экологических требований [Реутова и др., 2025].

Геофизические методы сопровождения технологических процессов позволяют создать доказательную базу для обоснования возможности и целесообразности приоритетных направлений в горном производстве, подземном строительстве и обогащении руд [Askaripour et al., 2022; Cristelo et al., 2020; Игнатьева и др., 2021; Тюляева и др., 2024].

Целью исследования является установление закономерностей взаимодействия природных и технических систем месторождений Садонского рудного узла в процессе оптимизации технологий добычи руд по критерию полноты и безопасности использования недр.

Методы исследования

Обобщение, систематизация, анализ, эксперимент, моделирование и прогнозирование осуществляются в процессе совершенствования системы геофизического контроля состояния массива горных пород с оптимальным использованием инструментов и приборов геофизического мониторинга.

С использованием общепринятых методик исследуются аспекты утилизации хвостов переработки и местных материалов при изготовлении бетонных закладочных смесей. Результаты подземного блокового выщелачивания и извлечения металлов из промышленных стоков месторождений получены по адаптированным к местным условиям методикам автора.

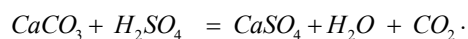
Охарактеризованы основные методы исследования рудовмещающего породного массива при технологическом воздействии на него.

На базе полученных данных создается модель взаимодействия природных и технических систем в районах интенсивного и масштабного комплексного освоения недр на примере РСО–Алания.

Результаты систематизации экспериментальных данных, оптимизации механизма управления состоянием массива и радикального изменения экологических показателей разработки месторождений положены в основу концепции комплексирования возможностей горных предприятий.

Результаты работы

При воздействии кислотными растворами на содержащие CaCO_3 породы образуется гипс:



Условия формирования искусственного массива моделировались на плоском стенде в масштабе 1:200. Верхний слой двухслойной секции образован доломитом, а в нижнем слое уложен инертный к кислоте алевролит с добавкой обожженной извести. Образующиеся кислые растворы фильтруются в нижний слой, где образуется вяжущее для бетона.

Без отвода воды гипс образуется в течение 3–4 месяцев, а если отводить ее в течение 2 недель, бетон набирает прочность 2,5 МПа, а объем его увеличивается на 10–30 %.

На первой стадии в качестве вяжущего исследуются портландцемент и комбинация портландцемента с мокромолотым гранулированным шлаком.

Результаты исследования контрольных кубов в возрасте 28 суток при расходе воды 20 дм³/м³ даны в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

**Составы с цементом и мелкой фракцией хвостов /
Compositions with cement and fine tailings**

Расход портландцемента, кг/м ³ / Consumption of Portland cement, kg/m ³	30	60	80	100	120	180
Прочность мизурских кубов, МПа / The strength of the Mizur cubes, MPa	0,50	0,75	0,81	0,92	1,00	1,30
Прочность тырнаузских кубов, МПа / Strength of Tyrnauz cubes, MPa	0,41	0,53	0,66	0,74	0,87	1,15
Прочность урупских кубов, МПа / Strength of Urup cubes, MPa	0,48	0,69	0,78	0,87	0,92	1,24

Прочность бетонных кубов, в которых заполнитель комбинируется, увеличивается (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Прочность смесей с комбинированным составом, МПа /
Strength of mixtures with combined composition, MPa**

Расход портландцемента, кг/м ³ / Consumption of Portland cement, kg/m ³	30	60	80	100	120	180
Мизурские пробы / The Mizur Trials	0,65	0,82	0,93	0,99	1,27	1,65
Тырнаузские пробы / The Tarnauz trials	0,51	0,63	0,74	0,89	0,99	1,50
Урупские пробы / Urup trials	0,62	0,73	0,88	0,91	1,08	1,55

За счет комбинирования заполнителя по крупности прочность бетона увеличивается. Смеси с доломитом по прочности несколько уступают смесям с портландцементом.

Исследование параметров закладки из отходов обогащения

Эффективность комбинирования вяжущих оценивали оптическим методом с нагружением модели на центрифуге. Образец помещали в термостат и выдерживали при температуре 100–130 °С, при которой разность хода лучей постоянна.

Исследована серия моделей, различающихся состоянием выработанного пространства, с заполнением смесями на цементной и доломитовой основе.

Наиболее безопасны варианты с заполнением пустот бетонной смесью, причем варианты заполнения выработанного пространства закладкой традиционного состава и с доломитом различаются несущественно.

Марка доломитовых вяжущих увеличивается при их активации в дезинтеграторе (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

**Прочность смеси с хвостовой добавкой после дезинтегратора /
Strength of the mixture with the tail additive after the disintegrator**

Расход материалов, кг/м ³ / Consumption of materials, kg/m ³			Осадка конуса, см / Cone draft, cm	Напряжение сдвига, Па / Shear stress, Pa	Прочность, МПа/ Strength, MPa		
Доломит/ Dolomite	Хвосты/ Tails	Вода/ Water			14	28	90
40	1650	350	9,20	140	0,60	0,82	0,97
80	1600	350	9,71	131	0,91	1,19	1,32
120	1550	350	10,01	125	1,19	1,30	1,53
180	1500	350	10,50	145	1,50	1,71	2,05

Погрешность измерений прочности для оценки воспроизводимости результатов составляет $\pm 0,05$ – $0,10$ МПа.

Для оценки активации в шаровой мельнице и в дезинтеграторе исследованы усредненные партии доломитов с тонкостью помола 40 % (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

**Смеси с доломитовым вяжущим после активации /
Mixtures with dolomite binder after activation**

Компоненты смеси, кг/м ³ / Components of the mixture, kg/m ³			Растекаемость, см / Spreading capacity, cm	Напряжение сдвига, Па / Shear stress, Pa	Прочность, МПа / Strength, MPa		
Доломит/ Dolomite	Заполнитель/ Filler	Вода/ Water			Возраст, сутки / Age, days		
					14	28	90
Шаровая мельница / Ball Mill							
40	1620	350	19,6	114	0,26	0,31	0,51
80	1590	350	22,1	119	0,32	0,43	0,65
120	1540	350	23,2	98	0,73	0,87	1,05
180	1480	350	20,1	120	1,20	1,35	1,51
Дезинтегратор / The disintegrator							
40	1600	350	18,4	106	0,30	0,45	0,63
80	1590	350	19,7	122	0,56	0,73	0,82
120	1540	350	18,9	97	0,88	1,02	1,26
180	1480	350	20,1	103	1,33	1,47	1,64

Погрешность измерений прочности для оценки воспроизводимости результатов составляет $\pm 0,05$ – $0,10$ МПа.

Выход активных мелких фракций доломита увеличился, и он может быть увеличен дальнейшей переработкой в дезинтеграторе.

Активация отходов повышает прочность бетона на 15–20 %.

Подземное блоковое выщелачивание

Месторождение «Какадур-Ханикомское» (РСО–Алания) представляло собой рудное тело, залегающее в рассланцованных осадочных породах крепостью 4–6 по М.М. Протодяконову. Выщелачивание руды в блоке длилось 220 суток.

Нарезные работы в блоке включали оформление монтажного и подсечного слоев, проходку выпускной дучки и отрезного восстающего (рис. 1).

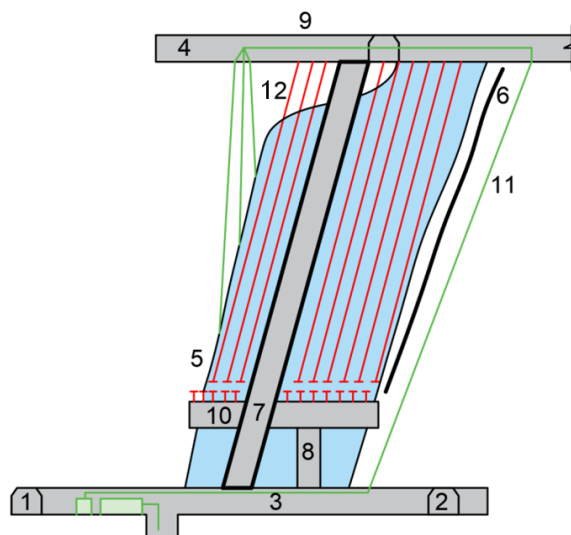


Рис. 1. Подготовка блока: 1,2,3,4 – выработки; 5 – рудное тело; 6 – рудообразующий разлом; 7 – отрезной восстающий; 8 – дучка; 9 – монтажный слой; 10 – подсечной слой; 11 – скважина для подачи растворов; 12 – взрывные скважины /

Fig. 1. Block preparation: 1,2,3,4 – workings; 5 – ore body; 6 – ore-forming fault; 7 – cut-off rising; 8 – duckling; 9 – mounting layer; 10 – cutting layer; 11 – well for solution delivery; 12 – blast wells

На месторождении «Быкогорское» (Северный Кавказ) с рудными телами в гранитопорфирах некондиционные запасы в течение 20 лет отрабатывали с этажной обойкой руды и выщелачиванием (рис. 2).

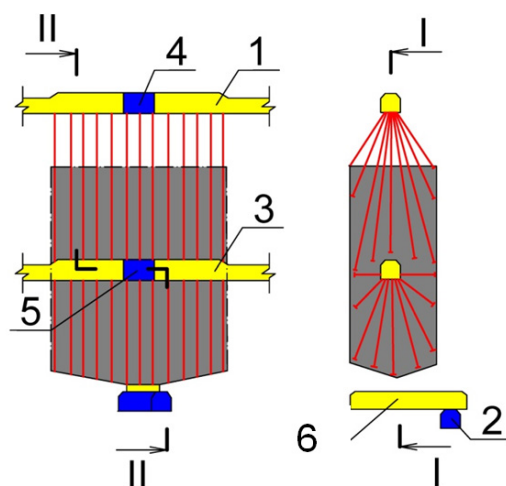


Рис. 2. Подготовка блока к выщелачиванию: 1 – оросительно-буровой штрек; 2 – нижний этажный штрек; 3 – буровой штрек; 4 – верхняя рассечка отрезной щели; 5 – нижняя рассечка отрезной щели; 6 – заходка /

Fig. 2. Preparation of the block for leaching: 1 – irrigation and drilling drift; 2 – lower storey drift; 3 – drilling drift; 4 – upper section of the cut-off slot; 5 – lower section of the cut-off slot; 6 – entry

Скорость выщелачивания металла снижается вследствие уменьшения градиента концентраций между поровым раствором и объемом растворителя. При высоте слоя 10 м и концентрации реагента в растворе 15 г/л за 300 суток было извлечено 59 % металла. В тех же условиях, но с уменьшением крупности в пределах 200–0 мм в верхней части до 100–0 мм в нижней части, те же 59 % металлов были извлечены за 260 суток.

Совершенствование способов подземного выщелачивания скальных технологически вскрываемых руд развивается в направлении сплошной отработки месторождений с минимизацией объемов горных выработок и совмещением их функций на основе оптимизации основных и вспомогательных процессов.

Извлечение металлов из стоков

Металлы осаждали из стоков Садонских месторождений с кислотностью pH 3–5, содержащих 60–250 г/м³ цинка и 5–10 г/м³ свинца. Осаждение проводили кальцинированной содой при pH = 8,5–9 в водосточной канавке штольни № 22 Архонского месторождения. За 31 день получено 52 т металлов в виде геля.

Выщелачивание в дезинтеграторе

Выщелачивание хвостов обогащения осуществляется при комбинированном механическом и химическом воздействии в дезинтеграторе (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

Извлечение металлов в раствор / Extraction of metals into solution

Выщелачивание в агитаторе / Leaching in the agitator				Выщелачивание в дезинтеграторе / Leaching in the disintegrator			
Содержание в хвостах, % The content in the tails, %				Содержание в хвостах, % The content in the tails, %			
Цинк – 0,95 Zinc – 0.95		Свинец – 0,84 Lead – 0.84		Цинк – 0,95 Zinc – 0.95		Свинец – 0,84 Lead – 0.84	
Извлечение за 0,2–1,0 ч, %/ Extraction in 0.2–1.0 hours, %		Извлечение за 0,2–1,0 ч, %/ Extraction in 0.2–1.0 hours, %		Извлечение за 10 с, %/ Extraction in 10 seconds, %		Извлечение за 10 с, %/ Extraction in 10 seconds, %	
Извлечено / Extracted	Остаток / Residue	Извлечено / Extracted	Остаток / Residue	Извлечено / Extracted	Остаток / Residue	Извлечено / Extracted	Остаток / Residue
24	72	16	71	28	69	24	62

Физические методы исследования массивов

Физические методы характеризуются данными таблицы 6.

Таблица 6 / Table 6

Типизация физических методов / Method typing

Метод / Method	Определяющий параметр / Defining parameter	Цель / Aim
Ультразвуковой каротаж / Ultrasonic logging	Электрическое сопротивление / Electrical resistance	Оценка неоднородности массива / Assessment of the heterogeneity of the scale
Электрический каротаж / Electrical logging	Диэлектрическая проницаемость / Dielectric constant	
Магнитный каротаж / Magnetic logging	Магнитная проницаемость / Magnetic permeability	

Полная разгрузка напряжений / Full stress relief	Упругие деформации / Elastic deformations	Оценка напряжений / Stress assessment
Параллельные скважины / Parallel wells		
Регистрация деформаций отверстия в керне / Registration of hole deformations in the core		
Акустическая эмиссия / Acoustic emission	Акустические сигналы в диапазоне частот 10–100 кГц / Acoustic signals in the frequency range of 10–100 kHz	Оценка неоднородности массива / Estimation of the heterogeneity of an array
Сейсмоакустический / Seismoacoustic	Сейсмоакустические сигналы в диапазоне частот 100–1000 Гц / Seismic and acoustic signals in the frequency range of 100–1000 Hz	
Сейсмический / Seismic	Сейсмические волны в диапазоне 30–500 Гц / Seismic waves in the range of 30–500 Hz	
Электрометрический / Electrometric	Электрическое сопротивление пород / Electrical resistance of rocks	Оценка напряжений / Stress assessment

Сейсмология. Пьезоэлектрический метод основан на изучении электромагнитного поля, возникающего вследствие создаваемого сейсмическими волнами пьезоэлектрического эффекта. Бальность динамических явлений определяется скоростью движения пород или их ускорением и смещением.

Гравитация. Методами гравиметрии определяют параметры и конфигурацию главных напряжений в элементах выработок (рис. 3).

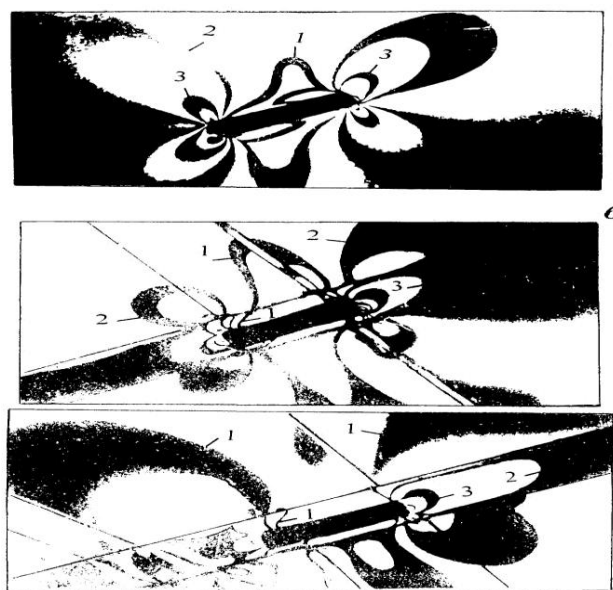


Рис. 3. Напряжения в окрестностях выработки: а – однородная среда; б – в кровле послойная зона, пересеченная разломом; 1-3 – линии изохром /

Fig. 3. Stresses in the vicinity of the mine: a is a homogeneous medium; b is a layered zone in the roof, crossed by a fault; 1-3 are isochrome lines

Магнетизм. По изменению остаточной намагниченности, обусловленной инверсией горных пород, уточняют условия формирования массивов, глубину залегания и мощность залежей руд магнетитового состава.

Оптика. Стенки скважин покрывают цементным раствором, который служит индикатором деформирования пород (рис. 4).

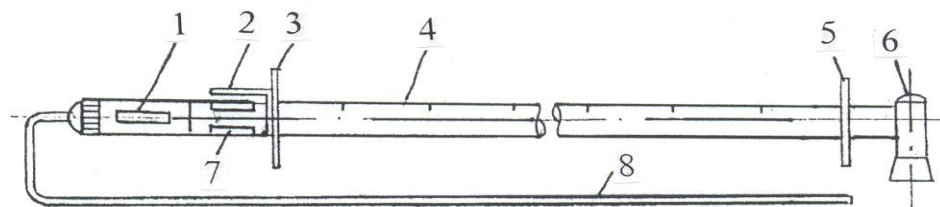


Рис. 4. Конструкция оптического прибора: 1 – источник света; 2 – масштабная линейка; 3 – направляющий диск; 4 и 5 – направляющие диски; 6 – окулярная насадка; 7 – объектив; 8 – провода /

Fig. 4. Optical device design: 1 – light source; 2 – scale ruler; 3 – guide disc; 4 and 5 – guide discs; 6 – eyepiece nozzle; 7 – lens; 8 – wires

Акустика. Возбуждаются упругие колебания, которые улавливают приборами.

Геотермия. По изменению теплового состояния участков земной коры выявляют области возникновения пожаров и опасные по горным ударам.

Геоэлектрика. Метод электрической разведки используется для изучения геолого-структурных условий месторождений.

Сейсмика. Упругие импульсы с преобладающей частотой 70–100 Гц являются основой для прогноза динамических явлений.

Гравитация. На моделях из эпоксимала определяют величину и знак главных напряжений.

Магнетизм. По остаточной намагниченности уточняют условия и параметры формирования массивов.

Выводы

1. Геофизические методы сопровождения технологических процессов позволяют обосновать возможность их совершенствования.

2. Закономерности взаимодействия природных и технических систем месторождений адекватны и могут быть оптимизированы по критериям полноты и безопасности использования недр.

3. Взаимодействие переменных факторов горного производства осуществляется в рамках физических моделей, разрабатываемых на основе опытного освоения технологий.

4. С точки зрения перспектив развития технологии выщелачивания для месторождений Садонского рудного узла наибольшего внимания заслуживают методы измерения фильтрационных параметров и оценки крупности руд.

Литература

1. Абрамкин Н.И., Ефимов В.И., Мансуров П.А. Эмпирические методики оценки состояния массива горных пород // Известия высших учебных заведений Горный журнал. – 2022. – № 2. – С. 68–76. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-2-68-76.

2. Адигамов А.Э., Юденков А.В. Модель напряженно-деформированного состояния нарушенного породного массива с учетом анизотропии и неоднородностей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 8. – С. 93–103. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_93.

3. Баловцев С.В., Воробьева О.В., Монастырев Н.Н., Кривошеева С.И., Копылова А.В., Кравцова Е.А. Безопасность и управление рисками в горном деле // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 2. (специальный выпуск 39). – 36 с.
4. Батугин А.С., Шевчук С.В., Шерматова С.С., Головки И.В., Бямбасурэн З. К вопросу мониторинга геологической опасности при геодинамическом взаимодействии объектов освоения недр // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 10-1. – С. 63–73. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_63.
5. Голик В.И., Комащенко В.И., Качурин Н.М. Концепция комбинирования технологий разработки рудных месторождений // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2015. – № 4. – С. 76–88.
6. Голик В.И., Бурдзиева О.Г. Извлечение металлов из убогого сырья и хвостов переработки руд с активацией процессов путем комбинирования химической и механической энергии // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 1. – С. 152–161. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.22.011.
7. Голик В.И. Сейсмобезопасные технологии подземной разработки рудных месторождений // Геология и геофизика Юга России. – 2025а. – Т. 15. № 1. – С. 56–64. DOI: 10.46698/VNC.2025.55.34.005.
8. Голик В.И. Итерационное моделирование технологий разработки месторождений Садонской геологической провинции // Геология и геофизика Юга России. – 2025б. – Т. 15. № 3. – С. 199–210. DOI: 10.46698/VNC.2025.73.38.002.
9. Месхи Б., Плешко М., Булыгин Ю., Алексеенко Л., Молев М. Обеспечение безопасной эксплуатации и оценка состояния подземных сооружений методом акустической резонансной дефектоскопии // Серия конференций ИОР: Наука о Земле и окружающей среде. – 2017. – Вып. 90. № 1. – Art. No. 012217.
10. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Кузиев Д.А., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Бобырь Н.В. Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 61–70. DOI: 10.31897/PMI.2022.2
11. Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М., Горелкина Е.И. Классификация георесурсов в парадигме их комплексного освоения // Горная промышленность. – 2024. – № 6. – С. 140–143.
12. Хакулов В.А., Крапивский Е.И., Блаев Б.Х., Шаповалов В.А. Технология формирования качества руд Тырныаузского месторождения с использованием предварительной сортировки и обогащения // Обогащение руд. – 2018. – № 5. – С. 33–40.
13. Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р. Природное и антропогенное загрязнение микроэлементами верховий бассейна р. Ардон // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 2. – С. 219–230. DOI: 10.46698/VNC.2025.46.62.001.
14. Agelet de Saracibar C. Nonlinear continuum mechanics – An engineering approach. Springer, 2022. – 346 p. DOI: 10.1007/978-3-031-15207-8.
15. Askaripour M., Saeidi A., Rouleau A., Mercier-Langevin P. Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods // Underground Space. – 2022. – Vol. 7. Issue 4. – pp. 577–607.
16. Cristelo N., Coelho J., Oliveira M., Cesar Consoli N., Palomo A., Fernandez-Jimenez A. Recycling and application of mine tailings in alkali-activated cements and mortars-strength development and environmental assessment // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10. No. 6. – Art. No. 2084. DOI: 10.3390/app10062084.
17. Di Y., Wang E., Li Z., Liu X., Huang T., Yao J. Comprehensive early warning method of microseismic, acoustic emission, and electromagnetic radiation signals of rock burst based on deep learning // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2023. – Vol. 170. – Art. No. 105519. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2023.105519.
18. Golik V.I., Razorenov Y.I., Polukhin O.N. Metal extraction from ore beneficiation codas by means of lixiviation in a disintegrator // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10. No. 17. – pp. 38105–38109.
19. Liu Z., Zhao X., Tan J., Tian H. Model and simulation of engineering safety risk control based on artificial intelligence algorithm // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2022. – Vol. 2022. – DOI: 10.1155/2022/3204317.

20. Ma L., Ghorbani Y., Kongar-Syuryun C.B., Khayrutdinov M.M., Klyuev R.V., Petenko A., Brigida V. Dynamics of backfill compressive strength obtained from enrichment tails for the circular waste management // Resources, Conservation and Recycling Advances. – 2024. – Vol. 23. Art. No. 200224. DOI: 10.1016/j.rcradv.2024.200-214.

References

1. Abramkin N.I., Efimov V.I., Mansurov P.A. Empirical techniques for assessing rock mass condition. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2022. No. 2 pp. 68–76. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-2-68-76. (In Russ.)
2. Adigamov A.E., Yudenkov A.V. Stress-strain behavior model of disturbed rock mass with regard to anisotropy and discontinuities. *Mining information and Analytical Bulletin*. 2021. No. 8. pp. 93–103. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_93. (In Russ.)
3. Balovtsev S.V., Vorobyeva O.V., Monastirev N.N., Krivosheeva S.I., Kopylova A.V., Kravtsova E.A. Safety and risk management in mining. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2017. No. 2. (Special Issue 39). 36 p. (In Russ.)
4. Batugin A.S., Shevchuk S.V., Shermatova S.S., Golovko I.V., Byambasuren Z. Geoecological hazard monitoring in geodynamic interaction of subsoil use objects. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2021. No. 10-1. pp. 63–73. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_63. (In Russ.)
5. Golik V.I., Komashchenko V.I., Kachurin N.M. Concept of combining technologies by mining ore deposits. *Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2015. No. 4. pp. 76–88. (In Russ.)
6. Golik V.I., Burdzieva O.G. Extraction of metals from low-grade raw materials and ore processing tailings with process activation by combining chemical and mechanical energy. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 1. pp. 152–161. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.22.011. (In Russ.)
7. Golik V.I. Earthquake safe technologies of underground mining of ore deposits. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 1. pp. 56–64. DOI: 10.46698/VNC.2025.55.34.005. (In Russ.)
8. Golik V.I. Iterative modeling of field development technologies in the Sadon geological province. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15 No. 3. pp. 199–210. DOI: 10.46698/VNC.2025.73.38.002. (In Russ.)
9. Meskhi B., Pleshko M., Bulygin Yu., Alekseenko L., Molev M. Ensuring safe operation and assessment of the condition of underground structures by acoustic resonance flaw detection. In: *IOP conference series: Earth and Environmental Science*. 2017. Issue 90. No. 1. Art. No. 012217. (In Russ.)
10. Rybak J., Khayrutdinov M.M., Kuziev D.A., Kongar-Syuryun C.B., Babyr N.V. Prediction of the geomechanical state of the rock mass when mining salt deposits with stowing. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 253. p. 61–70. DOI: 10.31897/PMI.2022.2. (In Russ.)
11. Tyulyaeva Yu.S., Khairutdinov A.M., Gorelkina E.I. Classification of georesources in the paradigm of their integrated development. *Mining Industry*. 2024. No. 6. pp. 140–143. (In Russ.)
12. Khakulov V.A., Krapivskiy E.I., Blaev B.Kh., Shapovalov V.A. Technology of ore quality formation at the Tyrnyauz deposit using pre-sorting and enrichment. *Ore processing*. 2018. No. 5. pp. 33–40. (In Russ.)
13. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R. Natural and anthropogenic microelement pollution of the upper reaches of the Ardon River basin. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 2. pp. 219–230. DOI: 10.46698/VNC.2025.46.62.001. (In Russ.)
14. Agelet de Saracibar C. *Nonlinear continuum mechanics – An engineering approach*. Springer. 2022. 346 p. DOI: 10.1007/978-3-031-15207-8.
15. Askaripour M., Saeidi A., Rouleau A., Mercier-Langevin P. Rockburst in under-ground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods. *Underground Space*. 2022. Vol. 7. Issue 4. pp. 577–607.
16. Cristelo N., Coelho J., Oliveira M., Cesar Consoli N., Palomo A., Fernandez-Jimenez A. Recycling and application of mine tailings in alkali-activated cements and mortars-strength

development and environmental assessment. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. No. 6. Art. No. 2084. DOI: 10.3390/app10062084.

17. Di Y., Wang E., Li Z., Liu X., Huang T., Yao J. Comprehensive early warning method of microseismic, acoustic emission, and elec-tromagnetic radiation signals of rock burst based on deep learning. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2023. Vol. 170. Art. No. 105519. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105519.

18. Golik V.I., Razorenov Y.I., Polukhin O.N. Metal extraction from ore beneficiation codas by means of lixiviation in a disintegrator. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. Vol. 10. No. 17. pp. 38105–38109.

19. Liu Z., Zhao X., Tan J., Tian H. Model and simulation of engineering safety risk control based on artificial intelligence algorithm. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2022. Vol. 2022. DOI: 10.1155/2022/3204317.

20. Ma L., Ghorbani Y., Kongar-Syuryun C.B., Khayrutdinov M.M., Klyuev R.V., Petenko A., Brigida V. Dynamics of backfill compressive strength acquired from enrichment tails for the circular waste management. *Resources, Conservation and Recycling Advances*. 2024. Vol. 23. Art. No. 200224. DOI: 10.1016/j.rcradv.2024.200-214.

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2026.28.96.001

Оригинальная статья

Оценка динамических характеристик и сейсмической уязвимости шестиэтажного железобетонного здания в Армении с использованием метода Накамуры

Дж.К. Карапетян[✉], О.Ю. Айрапетян[✉], А.В. Элоян[✉],
Р.К. Карапетян[✉], С.Р. Шахпаронян[✉]

Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. акад. А. Назарова НАН РА,
Республика Армения, 3115, г. Гюмри, ул. В. Саргсяна, 5а,
e-mail: jon_iges@mail.ru; hhmy39@gmail.com

Статья поступила: 11.11.2025, доработана: 15.05.2026, принята к публикации: 25.05.2026

Резюме: Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки сейсмической уязвимости железобетонного здания середины XX века, расположенного на территории Республики Армения – региона с высоким уровнем сейсмической опасности. Сооружение возведено до вступления в силу современных норм сейсмостойкого проектирования и в процессе эксплуатации подверглось ряду конструктивных модификаций, что привело к трансформации его динамических характеристик и снижению несущей способности. Определение фактических динамических параметров эксплуатируемых зданий представляет ключевую задачу при разработке мероприятий по снижению сейсмического риска и обосновании инженерных решений по усилению конструкций. **Цель исследования** – количественная оценка динамических характеристик и степени сейсмической уязвимости шестиэтажного железобетонного здания 1960-х годов постройки посредством определения интегральных показателей жёсткости несущей системы, собственных периодов колебаний и расчётных индексов уязвимости. **Методы:** выполнена многоточечная регистрация микросейсмических колебаний в характерных точках здания. Обработка временных рядов осуществлялась методом спектральных отношений горизонтальных и вертикальных компонент (HVSR) по методике Накамуры, что позволило идентифицировать основные собственные периоды и формы колебаний несущей системы. На основании установленных параметров рассчитаны коэффициенты сейсмической уязвимости для отдельных конструктивных зон. Подход обеспечивает неразрушающую диагностику изменений жёсткостных характеристик, обусловленных эксплуатационными воздействиями и реконструктивными вмешательствами. **Результаты** выявили выраженную неоднородность распределения жесткости, как по высоте здания, так и в плане, с локализацией зон пониженной жёсткости в отдельных конструктивных секциях. Рассчитанные индексы уязвимости свидетельствуют о повышенной восприимчивости указанных зон к сейсмическим воздействиям, включая вероятность резонансного усиления колебаний при совпадении собственных частот сооружения с преобладающими частотами возбуждения. Полученные данные подтверждают эффективность метода HVSR для оперативной диагностики динамических характеристик железобетонных зданий и оценки их сейсмостойкости. Сформулированы рекомендации по локальному усилению критических зон несущей системы и внедрению систем непрерывного инструментального мониторинга для минимизации сейсмического риска и обеспечения безопасной эксплуатации здания.

Ключевые слова: регистрация микросейсмических колебаний, динамические характеристики, HVSR-анализ, метод Накамуры, резонансная частота.

Для цитирования: Карапетян Дж.К., Айрапетян О.Ю., Элоян А.В., Карапетян Р.К., Шахпаронян С.Р. Оценка динамических характеристик и сейсмической уязвимости шестиэтажного железобетонного здания в Армении с использованием метода Накамуры. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 57–70. DOI: 10.46698/VNC.2026.28.96.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.28.96.001

Original paper

Assessment of dynamic characteristics and seismic vulnerability of a six-storey reinforced concrete building in Armenia using the Nakamura method

J.K. Karapetyan^{ORCID}, H.Yu. Hayrapetyan^{ORCID}, A.V. Eloyan^{ORCID},
R.K. Karapetyan^{ORCID}, S.R. Shahparonyan^{ORCID}

Institute of Geophysics and Engineering Seismology after A. Nazarov of NAS RA,
5a V. Sargsyan Str., Gyumri 3115, Republic of Armenia,
e-mail: jon_iges@mail.ru; hhmy39@gmail.com

Received: 11.11.2025, revised: 15.05.2026, accepted: 25.05.2026

Abstract: This study addresses the seismic vulnerability of a mid-twentieth-century reinforced concrete building in the Republic of Armenia, a region of high seismic hazard. The structure was erected prior to modern seismic design codes and has undergone structural modifications during service, leading to changes in its dynamic characteristics and a reduction in load-bearing capacity. Determining the actual dynamic parameters of existing buildings is a key task in seismic risk mitigation and the rationale for retrofitting. **The aim** is to quantitatively assess the dynamic characteristics and seismic vulnerability of a six-storey reinforced concrete building constructed in the 1960s through integral stiffness indicators, natural periods of vibration, and vulnerability indices. **Methods:** multi-point recording of microseismic vibrations was performed at representative points within the building. Time series were processed using the horizontal-to-vertical spectral ratio (HVSr) method following the Nakamura technique, identifying the principal natural periods and mode shapes of the load-bearing system. Vulnerability coefficients were then computed for individual structural zones. The approach provides non-destructive diagnostics of stiffness changes induced by operational loads and reconstruction interventions. **Results** revealed pronounced heterogeneity in stiffness distribution along the height and in plan, with reduced-stiffness zones localised in specific sections. The vulnerability indices indicate increased susceptibility of these zones to seismic actions, including resonant amplification when the natural frequencies of the structure coincide with dominant excitation frequencies. The data confirm the effectiveness of HVSr for rapid diagnosis of dynamic characteristics of reinforced concrete buildings and assessment of seismic resistance. Recommendations are formulated for local strengthening of critical zones and continuous monitoring to minimise seismic risk and ensure safe operation.

Keywords: microseismic vibration recording, dynamic characteristics, HVSr analysis, Nakamura method, resonant frequency.

For citation: Karapetyan J.K., Hayrapetyan H.Yu., Eloyan A.V., Karapetyan R.K., Shahparonyan S.R. Assessment of dynamic characteristics and seismic vulnerability of a six-storey reinforced concrete building in Armenia using the Nakamura method. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 57–70. DOI: 10.46698/VNC.2026.28.96.001

Введение

Оценка структурной уязвимости и динамических характеристик эксплуатируемых сооружений представляет собой фундаментальную задачу обеспечения сейсмической безопасности застройки, приобретающую особую значимость в регионах с высоким уровнем сейсмической опасности. Республика Армения, расположенная в пределах Кавказско-Анатолийского сегмента Альпийско-Гималайского сейсмиче-

ского пояса, характеризуется сложным тектоническим строением и историей разрушительных сейсмических событий, что определяет приоритетность исследований динамического поведения существующих конструкций при потенциальных сейсмических воздействиях [Геодакян и др., 2023; Свалова, Заалишвили, 2024]. Железобетонный фонд застройки, преимущественно сформированный в середине XX века, характеризуется существенной вариативностью сейсмостойкости, обусловленной несовершенством проектных решений того периода, деградацией физико-механических свойств материалов в процессе длительной эксплуатации и кумулятивным влиянием конструктивных модификаций [Карапетян и др., 2021; Хачиян, 2015; Cosenza et al., 2002; Berto et al., 2009]. Особую значимость указанная проблематика приобрела после катастрофического Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г. ($M_s = 6,9$), приведшего к массовым обрушениям несущих конструкций железобетонных зданий и продемонстрировавшего критическую недооценку сейсмических воздействий в проектных нормах советского периода.

Объектом настоящего исследования является каркасное железобетонное здание 1960-х годов постройки прямоугольной формы в плане размерами $15,0 \times 54,0$ м, включающее полуподвальный уровень и шесть надземных этажей. Отсутствие исходной проектно-исполнительной документации существенно затрудняет верификацию структурной целостности объекта, а многолетние ремонтные и реконструктивные вмешательства, включая локальные пристройки, привели к трансформации динамических характеристик здания и изменению его восприимчивости к сейсмическим воздействиям. Выполненные ранее обследования (2008 и 2023 гг.) установили вторую категорию технического состояния по локальной классификации, что обусловило необходимость углубленного диагностического анализа. Ограниченная информативность визуального осмотра, связанная со скрытым характером ряда конструктивных модификаций и повреждений, определила обоснованность применения инструментальных методов для комплексной оценки динамических параметров и индексов сейсмической уязвимости. Согласно действующей классификации Республики Армения, объекты второй категории технического состояния подлежат обязательному инструментальному обследованию с последующим обоснованием программы сейсмоусиления.

Основные задачи исследования включают: идентификацию фактических динамических характеристик здания и грунтов основания, включая преобладающие периоды колебаний и пространственное распределение жесткостных параметров; расчёт и интерпретацию коэффициентов сейсмической уязвимости методом Накамуры с количественной оценкой уровней риска для отдельных зон; идентификацию резонансных эффектов посредством сопоставления собственных периодов здания и грунтов основания; разработку рекомендаций по локальному сейсмоусилению критических зон и формирование программы инструментального мониторинга в процессе эксплуатации.

Регистрация микросейсмических колебаний выполнялась в характерных точках здания и на прилегающей территории в ночное время для минимизации антропогенных помех. Обработка временных рядов осуществлялась специализированным программным обеспечением и обеспечивала построение кривых HVSR, отражающих преобладающие частоты несущей системы и подстилающих грунтов. Метод спектрального отношения горизонтальных и вертикальной компонент (HVSR), известный как метод Накамуры, представляет собой устоявшийся подход к идентификации динамических характеристик сооружений и грунтов [Агаева и др., 2025; Заалишвили и др., 2024; Капустян и др., 2025; Аносов и др., 2010; Nakamura, 1997; Nakamura et al., 2000; Nakamura, 2019; Irie, Nakamura, 2000; Dal Moro, Panza, 2021; Fazriati et al.,

2023; Gallipoli et al., 2010; Giacomo et al., 2005; Kapustian et al., 2013; Kawase et al., 2014; Mucciarelli et al., 2003; Sungkono et al., 2011]. Он основан на регистрации фоновое сейсмического шума и позволяет диагностировать резонансные явления при взаимодействии в системе «сооружение–основание».

Метод Накамуры реализован посредством разработанного авторским коллективом программного инструментария, обеспечивающего повышенную точность обработки данных и расширенный функционал спектрального анализа, идентификации экстремумов и визуализации HVSR-функций.

Многоточечная регистрация на различных уровнях несущей системы обеспечила разрешение, достаточное для фиксации вариативности динамических характеристик. Анализ спектральных отношений позволил установить закономерности взаимодействия в системе «здание–основание» и выявить зоны с трансформированными параметрами вследствие модификаций и пристроек. Сопоставление с нормативными значениями обеспечило выявление рисков резонансного усиления.

Работа развивает методологию оценки сейсмического риска применительно к стареющему железобетонному фонду Республики Армения и регионов сопоставимых геодинамических условий. Результаты представляют собой научно-методическую основу для разработки стратегий сейсмоусиления, повышения надёжности существующих зданий и совершенствования национальной нормативной базы в части стареющей инфраструктуры и эволюции региональных сейсмических рисков [Ditommaso et al., 2012].

Методология исследования

В основу исследований положен метод спектрального отношения горизонтальных и вертикальной компонент микросейсмических колебаний (HVSR), предложенный Ю. Накамурой [Nakamura, 1997; Nakamura et al., 2000; Nakamura, 2019] и широко применяемый в инженерной сейсмологии для определения динамических характеристик сооружений и грунтов основания. Теоретическая основа базируется на преобладании поперечных волн SH в фоновом шуме и инвариантности вертикальной компоненты относительно резонансных эффектов в приповерхностной толще, что позволяет интерпретировать горизонтальную составляющую как меру локального усиления и определять собственные частоты по экстремумам спектрального отношения. К преимуществам метода относятся неразрушающий характер регистрации, оперативность полевых измерений и независимость от активного источника возбуждения, что определяет его применимость для диагностики эксплуатируемых сооружений при ограничениях на динамические испытания. Применение требует соблюдения методологических ограничений: достаточной длительности регистрации для статистической устойчивости оценок, отсутствия импульсных антропогенных помех и стабильности температурно-влажностных условий, влияющих на жесткостные характеристики конструкции.

Инструментальные наблюдения выполнялись в характерных точках здания и на грунтах основания; продолжительность регистрации в каждой точке составляла десять минут при минимизации шумовых помех. Регистрация выполнялась трёхкомпонентным сейсмометром SeismoLog (рис. 1) лабораторной разработки с аналого-цифровым преобразованием 10 бит, коэффициентом усиления 200 в дифференциальном режиме и диапазоном измерения $\pm 10^{-5}$ В. Прибор построен на базе трёхосного геофона ST-4.5N (чувствительность $28,8 \pm 5$ % В·с/см, собственная частота $4,5 \pm 10$ % Гц) и обеспечивает регистрацию двух ортогональных горизонтальных (В–З, С–Ю) и вертикальной компонент. Данные сохраняются в формате JSON, содержащем метаданные и временные ряды трёхкомпонентного сигнала.

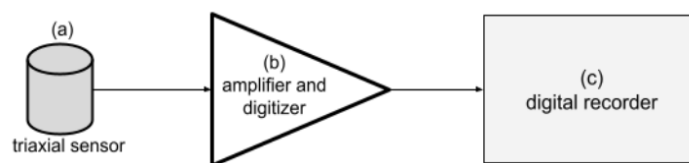


Рис. 1. Схема прибора SeismoLog /

Fig. 1. Schematic diagram of the SeismoLog instrument

Предварительная обработка временных рядов направлена на устранение импульсных и подавление стационарных шумовых составляющих. Фрагменты с амплитудными выбросами исключались из анализа; спектральный диапазон ограничивался полосовым фильтром Баттерворта с частотами среза 2 и 10 Гц. Для минимизации утечки спектра применялось весовое окно Хэмминга [Fazriati et al., 2023]. Переход в частотную область выполнялся посредством быстрого преобразования Фурье. Сглаживание спектральных оценок осуществлялось фильтром Баттерворта второго порядка для подавления высокочастотных осцилляций и устойчивого выделения преобладающих частот, отражающих резонансные свойства системы.

Идентификация преобладающей частоты колебаний осуществляется через расчёт спектрального отношения горизонтальных и вертикальной компонент H по формуле (1):

$$H(f) = \frac{\sqrt{X^2(f) + Y^2(f)}}{Z(f)} \quad (1)$$

где X , Y и Z – спектральные компоненты продольной, поперечной и вертикальной составляющих сигнала. Локальные максимумы кривой HVSR соответствуют преобладающим частотам колебательной системы, глобальный максимум интерпретируется как резонансная частота и используется для оценки эффективной мощности осадочной толщи основания [Fazriati et al., 2023].

Объект исследования

Объектом исследования является каркасное железобетонное здание 1960-х годов постройки, прямоугольное в плане, габаритами $15,0 \times 54,0$ м, с полуподвальным уровнем и шестью надземными этажами (рис. 2). Аналитическая обработка данных и количественная оценка сейсмической уязвимости проводились в соответствии с действующей нормативной базой Республики Армения и современными международными подходами к оценке уязвимости железобетонных сооружений. Объект эксплуатируется как учебно-административное здание с массовым пребыванием людей, что определяет его повышенный класс ответственности и необходимость детализированной оценки сейсмической надёжности.



Рис. 2. Здание с главного и заднего фасадов /

Fig. 2. Front and rear elevations of the building

Несущая система здания представляет собой сборный железобетонный рамно-связевой каркас, образованный поперечными многопролётными рамами с диафрагмами жёсткости и сборными междуэтажными перекрытиями. По результатам инженерных обследований 2008 и 2023 гг. техническое состояние отнесено ко второй категории согласно нормативной классификации Республики Армения; сформулированы рекомендации по устранению дефектов и усилению несущих элементов.

Существенным обстоятельством является отсутствие проектной и исполнительной документации. В процессе многолетней эксплуатации здание подвергалось ремонтам, модификациям и конструктивным вмешательствам, что затрудняет визуальную идентификацию фактических повреждений несущих элементов. В этих условиях объективная оценка технического состояния методами визуального осмотра не представляется возможной, что обусловило необходимость инструментального обследования как основного источника диагностической информации.

Результаты и обсуждение

Одним из ключевых факторов при оценке эксплуатационной надёжности здания является идентификация взаимосвязи между первой формой собственных колебаний его надземной части и резонансными характеристиками грунтов основания, определяющей вероятность возникновения резонансных явлений в системе «грунт–здание». До настоящего исследования комплексный инструментальный анализ динамического состояния здания не выполнялся. Для объективной диагностики динамических параметров несущей системы проведены натурные испытания здания и грунтов основания; собственные периоды колебаний определены методом регистрации микросейсмических колебаний.

Регистрация выполнялась в ночное время для минимизации антропогенного шумового фона. Сейсмоприёмники устанавливались в характерных точках несущей системы на разных этажах (рис. 3, табл. 1), что обеспечило идентификацию пространственного распределения жесткостных характеристик по высоте и в плане.



Рис. 3. Точки инструментальных наблюдений внутри здания /

Fig. 3. Instrumental measurement points inside the building

Спектральный анализ временных рядов выполнен для двух горизонтальных (X, Y) и вертикальной (Z) компонент (рис. 4–8); обобщённые результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Рассчитанные динамические характеристики грунтов основания и регистрации микросейсмических колебаний здания /
Calculated dynamic characteristics of the foundation soils and microseismic vibration recordings of the building

Фактически измеренные значения преобладающих периодов колебаний грунта, T_{0I} / Actual measured values of soil dominant periods, T_{0I}	На основе записей микросейсм, расчетное значение периода составляет $1.15T_{0I}$ согласно BSRA-20.04-2020 [BSRA-20.04-2020 ..., 2020] / Based on microtremor records, the calculated value of period is $1.15T_{0I}$, according to the BSRA-20.04-2020 [BSRA-20.04-2020 ..., 2020]	Этажи / Floors	Фактические значения преобладающих периодов (Т, с) / Значения отношений спектральных компонент H/V колебаний здания / Actual values of dominant periods (T, sec.) / Values of H/V ratios of spectral component of building vibrations		
			Секция I / Section I	Секция II / Section II	Секция III / Section III
0.21	0.242/4.3	0	0.175/3.316	-	0.12(0.4)/4.343
		1	0.159/2.648	0.22/3.056	0.344/4.133
		3	0.233(0.44)/10.0	0.23(0.44)/5.5	0.315/1.913
		6	0.313(0.44)/18.1	0.313(0.46)/10.8	0.315(0.45)/3.704

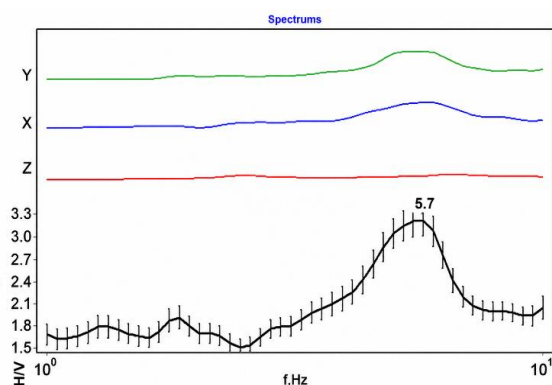


Рис. 4. HVSr (для компонент – X, Y, Z) в подвале /

Fig. 4. Instrumental records (for components – X, Y, Z) and HVSr on basement

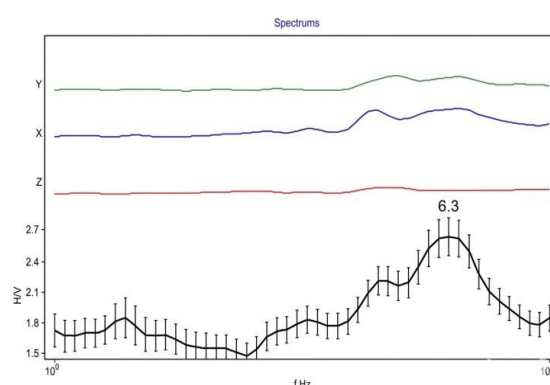


Рис. 5. HVSr (для компонент – X, Y, Z) на 1-м этаже /

Fig. 5. Instrumental records (for components – X, Y, Z) and HVSr on the 1st floor

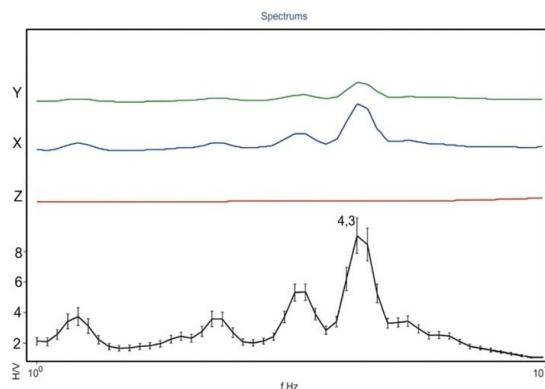


Рис. 6. HVSr (для компонент – X, Y, Z)
на 3-м этаже /

Fig. 6. HVSr curves (for X, Y, Z components)
on the 3rd floor

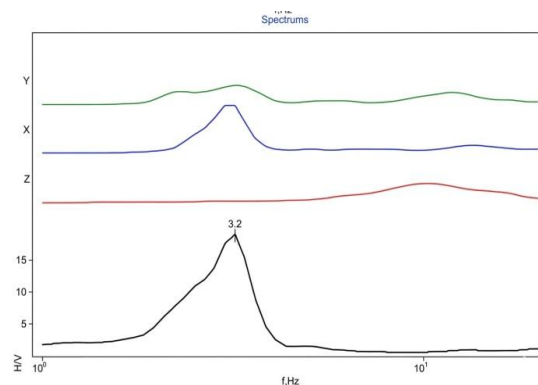


Рис. 7. HVSr (для компонент – X, Y, Z)
на 6-м этаже /

Fig. 7. HVSr curves for the X, Y, and Z
components on the 6th floor

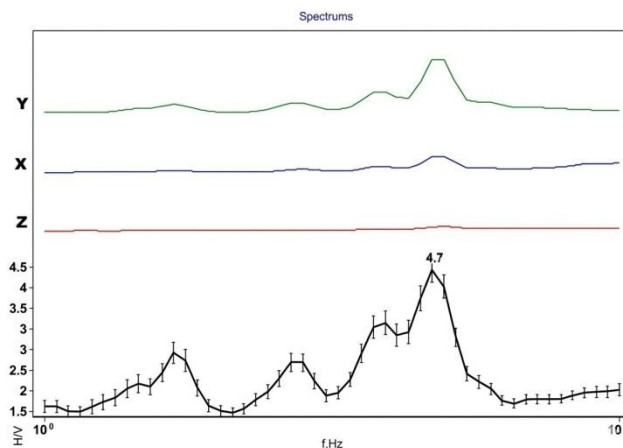


Рис. 8. HVSr (для компонент – X, Y, Z) на грунте /

Fig. 8. HVSr curves for the X, Y, and Z components on the ground

Измеренные амплитуды HVSr обнаруживают выраженную пространственную вариативность в пределах сооружения. Максимальные значения зафиксированы в зоне дополнительной лестничной клетки, минимальные – в части здания, примыкающей к соседнему сооружению. Неоднородность колебательного отклика свидетельствует о неравномерном динамическом поведении отдельных конструктивных зон, обусловленном влиянием пристроек и локальных конструктивных включений, трансформировавших исходные динамические характеристики несущей системы. По данным инструментальных измерений, преобладающие периоды колебаний шестого этажа варьируют в диапазоне 0,315–0,45 с, а период колебаний грунтов основания составляет 0,242 с (см. табл. 1), что соответствует I категории грунтов согласно строительным Нормам Республики Армения [BSRA-20.04-2020 ..., 2020] ($T_0 < 0,4$ с). Согласно статье 70 указанного норматива, для исключения резонансного взаимодействия в системе «грунт–сооружение» разность собственных периодов здания и грунтов основания должна удовлетворять одному из условий формулы (2).

Для рассматриваемого объекта при $T_0 = 0,242$ с и $T_1 = 0,175...0,315$ с пороговое значение составляет $1,3 \cdot T_0 = 1,3 \times 0,242 = 0,3146$ с. Значения преобладающих периодов в различных конструктивных зонах не превышают указанного порога, то есть формально условие резонансной отстройки не выполняется. Вместе с тем, согласно той же статье 70 [BSRA-20.04-2020 ..., 2020] при $T_1 < 0,4$ с указанные условия не

являются обязательными, что обусловлено особенностями сейсмической реакции жёстких сооружений на грунтах I категории.

Анализ коэффициентов сейсмической уязвимости

На основе графиков спектральных отношений H/V (HVSР) для отдельных секций здания (рис. 4–8) рассчитаны коэффициенты уязвимости несущей системы (K_b) и грунтов основания (K_s), а также интегральные индексы уязвимости для всех точек обследования. Результаты приведены в таблице 2. Коэффициенты рассчитывались по формуле $K = A^2/f$, где A – амплитуда HVSР на преобладающей частоте, f – соответствующая частота (Гц); показатель характеризует энергетический отклик системы и отражает концентрацию деформаций в её конструктивных зонах [Nakamura, 1997; Mucciarelli et al., 2003]. Анализ выявил выраженную пространственную дифференциацию коэффициентов уязвимости, отражающую кумулятивное влияние конструктивных вмешательств различных периодов эксплуатации на распределение жесткостных характеристик. Значения в полуподвальном уровне и на первом этаже в первом приближении воспроизводят фоновые характеристики 30-метровой толщи грунтов основания (V_{s30} -эквивалент), что свидетельствует о согласованности колебательного отклика нижних уровней с динамическими свойствами основания. Расхождение между полуподвалом и первым этажом существенно меньше, чем между нижними и верхними уровнями. Максимальные значения коэффициента уязвимости зафиксированы на шестом этаже в секции I (табл. 2). В переходных зонах между секциями I и II на третьем и шестом этажах соотношение составляет 2,8–3,4 раза, тогда как между секциями II и III – 6,1 для третьего и 8,5 для шестого этажа. Это свидетельствует о том, что наиболее динамически уязвимой зоной является конструктивный переход между секциями I и II, формирующий локальный концентратор сейсмического риска. Пониженные значения в III секции объясняются стабилизирующим влиянием пристройки в боковой части сооружения (рис. 1), функционирующей как дополнительный демпфирующий элемент.

Таблица 2 / Table 2

Значения коэффициентов уязвимости K_s и K_b , соотношение K_b/K_s и индексы уязвимости для различных частей здания /
Values of the vulnerability coefficients K_s and K_b , the K_b/K_s ratio, and the vulnerability indices for various parts of the building

K_s для грунтов / K_s for soils	Этажи / Floors	K_b для здания (K_b/K_s – отношение коэффициентов уязвимости) / K_b for building (K_b/K_s – the ratio of vulnerability coefficients)		
		Секция I / Section I	Секция II / Section II	Секция III / Section III
2.9÷5.1/4.4	0	1.9/(0.43-A)	-	2.27/(0.52-A)
	1	1.11/(0.25-A)	2.03/(0.46-A)	5.9/(1.34-B)
	3	23.3/(5.3-D)	6.9/(1.57-B)	1.14/(0.26-A)
	6	102.4/(23.3-D)	36.45/(8.28-D)	4.29/(0.98-A)

По данным таблицы 2, максимальные значения коэффициента уязвимости несущей системы зафиксированы на третьем и шестом этажах в секциях I и II: $K_b = 102,4$ (6-й этаж, секция I), 36,45 (6-й этаж, секция II) и 23,3 (3-й этаж, секция I). На основании указанных значений рассчитаны критические уровни пикового ускорения грунта (PGA) в диапазоне 12,8–320,8 см/с², соответствующие потенциальной локальной потере несущей способности отдельных конструктивных зон сооружения. Соглас-

но сейсмической шкале МСК-64, установленный диапазон ускорений соответствует интенсивности сейсмических воздействий 5–9 баллов, что свидетельствует о возможности проявления сейсмической уязвимости отдельных конструктивных зон уже при землетрясениях интенсивностью 5 баллов – статистически достижимом уровне сейсмической активности для рассматриваемого региона в течение проектного срока службы сооружения.

Для интегральной оценки сейсмического риска дополнительно рассчитан индекс обрушения η , определяемый как отношение коэффициента уязвимости несущей системы K_b к коэффициенту уязвимости грунтов основания K_s . В соответствии с общепринятой международной классификацией, диапазоны значений индекса η соответствуют четырём категориям сейсмического риска: низкому (категория А, $\eta \leq 1$), умеренному (категория В, $1 < \eta < 2$), высокому (категория С, $2 < \eta < 3$) и критическому с риском обрушения (категория D, $\eta > 3$). Результаты расчёта (табл. 2) выявили наличие конструктивных зон, относящихся к категории D – в секциях I и II на уровне шестого этажа, а также в секции I на уровне третьего этажа, что определяет указанные зоны как приоритетные объекты для целенаправленных мероприятий сейсмоусиления.

Выводы

На основании проведённых инструментальных и расчётно-аналитических исследований сформулированы следующие выводы:

- Метод регистрации микросейсмических колебаний с HVSR-анализом по методике Накамуры обеспечивает корректную идентификацию динамических параметров эксплуатируемых железобетонных зданий при отсутствии проектной документации и скрытых конструктивных вмешательствах, что подтверждает его применение как инструмента неразрушающей диагностики.
- Пространственная неоднородность собственных периодов ($T_1 = 0,175\text{--}0,315$ с по секциям и этажам) подтверждает дифференцированное влияние реконструкций и пристроек на распределение жесткостных характеристик и формирование локальных аномалий динамического отклика.
- Расчёт уязвимости выявил критическое возрастание K_b/K_s до 23,3 в секции I и 8,28 в секции II на шестом этаже, что соответствует категории риска D (катастрофический, с риском обрушения) и определяет уровни PGA 12,8–320,8 см/с², при которых вероятно локальная потеря несущей способности уже при воздействиях интенсивностью 5 баллов по шкале МСК-64.
- Сопоставление с требованиями статьи 70 RABC 20.04–2020 показывает, что при $T_1 < 0,4$ с условием резонансной отстройки формально не обязательно; тем не менее, неравномерность колебательного поведения по секциям обуславливает необходимость мероприятий по выравниванию жесткостных характеристик.
- HVSR-метод особенно значим для строительных объектов, находящихся в сложных инженерно-геологических условиях – межгорных котловинах, аллювиальных отложениях, водонасыщенных и слабоконсолидированных грунтах, склоновых зонах, – где эффекты усиления колебаний осадочной толщей и изменчивость резонансных характеристик основания требуют инструментальной оценки системы «грунт–сооружение»; традиционные подходы на основе нормативных спектральных характеристик в этих условиях не обеспечивают достоверной оценки уязвимости.
- Разработанный программный комплекс для HVSR-анализа обеспечивает оперативность и воспроизводимость обработки данных и может быть рекомендован для массового обследования фонда железобетонных зданий в сейсмоактивных регионах с целью приоритизации сейсмоусиления.

Заключение

HVSR-диагностика шестиэтажного железобетонного здания 1960-х годов постройки позволила количественно охарактеризовать его динамическое состояние и выявить пространственную дифференциацию жесткостных параметров, сформировавшуюся вследствие многолетних модификаций, пристроек и эксплуатационных воздействий. Вариативность собственных периодов и амплитуд спектральных отношений в различных секциях и уровнях отражает неоднородность жесткости несущей системы и формирование локальных аномалий динамического отклика.

Идентифицированы зоны предельной сейсмической уязвимости преимущественно в верхних этажах, определяющие интегральный риск объекта при сейсмических воздействиях умеренной интенсивности, статистически вероятных для региона в течение проектного срока службы. При формальном соответствии нормативным требованиям резонансной отстройки выявленная неоднородность свидетельствует о потенциальной нестабильности отдельных зон, что обосновывает необходимость адресного усиления, выравнивания жесткостных характеристик и инструментального мониторинга.

Результаты подтверждают обоснованность применения HVSR-подхода для диагностики стареющего фонда железобетонных зданий в условиях информационной неопределённости. Особую актуальность методология приобретает для Республики Армения с её высокой сейсмической опасностью, значительным фондом зданий советской постройки и сложными инженерно-геологическими условиями межгорных котловин с эффектами усиления колебаний осадочной толщей.

Существенным прикладным направлением является сейсмическая паспортизация зданий – документирование фактических динамических характеристик, индексов уязвимости и категорий риска. Формирование паспортов на основе HVSR-измерений обеспечивает объективную базу для классификации объектов по уязвимости, обоснования очередности сейсмоусиления и периодической переоценки состояния, что востребовано для типовой застройки с утраченной проектной документацией.

Разработанный инструментарий открывает перспективы построения региональных систем мониторинга, формирования приоритетов сейсмоусиления на муниципальном и национальном уровнях, а также совершенствования нормативной базы в части учёта фактических динамических характеристик при оценке остаточного ресурса. Дальнейшие исследования целесообразно провести в направлении интеграции HVSR-данных с вероятностным анализом сейсмической опасности (PSHA) и методами нелинейного динамического анализа (IDA, IM-based assessment), что обеспечит комплексную оценку сейсмического риска с учётом региональной сейсмологической обстановки и фактического состояния объектов.

Литература

1. Агаева Л.А., Мурадов Ё.Д., Гаражаев А.Б., Эбердыев Х.Г. Инженерно-геологические условия и оценка сейсмичности площадки строительства мечети в городе Аркадаге (Туркменистан) // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 3. – С. 37–52. DOI: 10.46698/VNC.2025.95.83.001.
2. Аносов Г.И., Дробиз М.В., Коновалова О.А., Сотников Д.С., Чугаевич В.Я. Оценка сейсмической устойчивости учебного корпуса № 3 Российского государственного университета им. И. Канта с применением методики Накамуры // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2010. – Вып. 15(1). – С. 223–231.
3. Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Заалишвили В.Б., Саакян Б.В., Оганесян С.М., Мкртчян М.А., Мкртчян Г.А. Региональная сейсмотектоника очаговых зон восточно-турецких землетрясений 06 февраля 2023 г. и геодинамическая модель очага сильнейшего

землетрясения ($M_w=7,8$) // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 42–54. DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004.

4. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Шманатов Г.В. Геоэкологические аспекты формирования интенсивности землетрясения на основе инструментальных данных // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 45–60. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004.

5. Капустян Н.К., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Акбиев Р.Т., Мерзликин Т.И., Морозова Т.В. Инженерно-сейсмометрические сети, как геофизический метод контроля воздействий опасных природно-техногенных процессов на урбанизированные территории // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 4. – С. 60–77. DOI: 10.46698/a1779-6138-3406-a.

6. Карапетян Дж.К., Айрапетян О.Ю., Матевосян Г.М., Карапетян Р.К. Сравнительный анализ динамических характеристик зданий различных типов при микросейсмических колебаниях // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 3. – С. 103–114. DOI: 10.46698/VNC.2021.70.17.009.

7. 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.

8. Хачиян Э.Е. Сейсмические воздействия и прогноз поведения сооружений. – Ереван: Изд. «Гитутюн» НАН РА, 2015. – 555 с.

9. Berto L., Vitaliani R., Saetta A., Simioni P. Seismic assessment of existing RC structures affected by degradation phenomena // Structural Safety. – 2009. – Vol. 31. No. 4. – pp. 284–297. DOI: 10.1016/j.strusafe.2008.09.006.

10. BSRA-20.04-2020. Earthquake Engineering. Design Standards, Republic of Armenia. Yerevan, 2020. – 93 p.

11. Cosenza E., Manfredi G., Verderame G.M. Seismic assessment of gravity load designed R.C. frames: critical issues in structural performance // Journal of Earthquake Engineering. – 2002. – Vol. 6. No. S1. – pp. 101–122. DOI: 10.1080/13632460209350434.

12. Dal Moro G., Panza G. Multiple-peak HVSR curves: Management and statistical assessment // Engineering Geology. – 2021. – Vol. 297. – Art. No. 106500. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106500.

13. Ditommaso R., Mucciarelli M., Parolai S., Picozzi M. Monitoring the structural dynamic response of a masonry tower: comparing classical and time-frequency analyses // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2012. – Vol. 10. – pp. 1221–1235. DOI: 10.1007/s10518-012-9347-x.

14. Fazriati E., Azhari M.R., Hakam A., Utama W., Rosandi Y. Horizontal to vertical spectral ratio (HVSR) analysis of the passive seismic data on alluvial lithology: an example from Bandung Basin Rim // Jurnal Penelitian Pendidikan IPA. – 2023. – Vol. 9. No. 1. – pp. 402–411. DOI: 10.29303/jppipa.v9i1.2962.

15. Gallipoli M.R., Mucciarelli M., Sket-Motnikar B., Zupancic P., Gosar A., Prevolnik S., Herak M., Stipcevic J., Herak D., Milutinovic Z., Olumceva T. Empirical estimates of dynamic parameters on a large set of European buildings // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2010. – Vol. 8. No. 3. – pp. 593–607. DOI: 10.1007/s10518-009-9133-6.

16. Giacomo D., Gallipoli M.R., Mucciarelli M., Parolai S., Richwalski S.M. Analysis and modeling of HVSR in the presence of a velocity inversion: the case of Venosa, Italy // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2005. – Vol. 95. No. 6. – pp. 2364–2372.

17. Irie Y., Nakamura Y. Dynamic characteristics of a RC building of five stories based on microtremor measurements and earthquake observations // In: 12th World Conference on Earthquake Engineering. – Auckland, New Zealand, 2000. – Art. No. 1747.

18. Kapustian N., Antonovskaya G., Agafonov V., Neumoin K., Safonov M. Seismic monitoring of linear and rotational oscillations of the multistory buildings in Moscow // Seismic Behavior of Irregular and Complex Structures. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. – 2013. – Vol. 24. – pp. 353–363.

19. Kawase H., Nagashima F., Matsushima S., Sanchez-Sesma F.J. Application of horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratios for both microtremors and earthquake motions based on the diffuse field theory // In: 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering (10NCEE). – Anchorage, Alaska, USA, 2014. – 10 p.

20. Mucciarelli M., Gallipoli M.R., Arcieri M. The stability of the horizontal-to-vertical spectral ratio of triggered noise and earthquake recordings // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2003. – Vol. 93. – pp. 1407–1412.
21. Nakamura Y. Seismic vulnerability indices for ground and structures using microtremor // In: *World Congress on Railway Research*. – Florence, Italy, 1997. – pp. 1–7.
22. Nakamura Y. What is the Nakamura method? // *Seismological Research Letters*. – 2019. – Vol. 90. No. 4. – pp. 1437–1443. DOI: 10.1785/0220180376.
23. Nakamura Y., Gurler E.D., Saita J., Rovelli A., Donati S. Vulnerability investigation of Roman Colosseum using microtremor // In: *12th World Conference on Earthquake Engineering*. – Auckland, New Zealand, 2000. – Art. No. 2660.
24. Sungkono, Warnana D., Triwulan, Utama W. Evaluation of buildings strength from microtremor analyses // *International Journal of Civil and Environmental Engineering IJCEE-IJENS*. – 2011. – Vol. 11. – pp. 108–114.

References

1. Agayeva L.A., Myradov Yo.D., Garajayev A.B., Eyeberdiyev H.G. Engineering-geological conditions and seismicity assessment of the construction site of a mosque in the city of Arkadag (Turkmenistan). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 3. pp. 37–52. DOI: 10.46698/VNC.2025.95.83.001. (In Russ.)
2. Anosov G.I., Drobiz M.V., Konovalova O.A., Sotnikov D.S., Chugaevich V.Ya. Evaluation of seismic stability of the educational building 3 of Immanuel Kant Russian State University using the Nakamura method. *Bulletin of KRAESC. Earth Sciences*. 2010. Issue 15(1). pp. 223–231. (In Russ.)
3. Geodakyan E.G., Karapetyan Jh.K., Zaalishvili V.B., Sahakyan B.V., Hovhannisyan S.M., Mkrtchyan M.A., Mkrtchyan G.A. Regional seismotectonics of focal zones of the east Turkey earthquakes on 06 February 2023 and geodynamic model of the source of the strongest earthquake ($M_w = 7.8$). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 42–54. DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004. (In Russ.)
4. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Shmanatov G.V. Geoecological aspects of earthquake intensity formation based on instrumental data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 45–60. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004. (In Russ.)
5. Kapustyan N.K., Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Akbiev R.T., Merzlikin T.I., Morozova T.V. Engineering seismometric networks as a geophysical method for monitoring the impact of hazardous natural and technogenic processes on urbanized areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 4. pp. 60–77. DOI: 10.46698/a1779-6138-3406-a. (In Russ.)
6. Karapetyan J.K., Hayrapetyan H.Yu., Matevosyan G.M., Karapetyan R.K. Comparative analysis of the dynamic characteristics of various types of buildings during microseismic vibrations. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11 No. 3. pp. 103–114. DOI: 10.46698/VNC.2021.70.17.009. (In Russ.)
7. 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.)
8. Khachiyan E.E. Seismic effects and prediction of structural behavior. Yerevan. Gitutun Publishing House of NAS RA. 2015. 55 p. (In Russ.)
9. Berto L., Vitaliani R., Saetta A., Simioni P. Seismic assessment of existing RC structures affected by degradation phenomena. *Structural Safety*. 2009. Vol. 31. No. 4. pp. 284–297. DOI: 10.1016/j.strusafe.2008.09.006.
10. BSRA-20.04-2020. Earthquake Engineering. Design Standards, Republic of Armenia. Yerevan. 2020. 93 p.
11. Cosenza E., Manfredi G., Verderame G.M. Seismic assessment of gravity load designed R.C. frames: critical issues in structural performance. *Journal of Earthquake Engineering*. 2002. Vol. 6. No. S1. pp. 101–122. DOI: 10.1080/13632460209350434.
12. Dal Moro G., Panza G. Multiple-peak HVSR curves: Management and statistical assessment. *Engineering Geology*. 2021. Vol. 297. Art. No. 106500. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106500.

13. Ditommaso R., Mucciarelli M., Parolai S., Picozzi M. Monitoring the structural dynamic response of a masonry tower: comparing classical and time-frequency analyses. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2012. Vol. 10. pp. 1221–1235. DOI: 10.1007/s10518-012-9347-x.
14. Fazriati E., Azhari M.R., Hakam A., Utama W., Rosandi Y. Horizontal to vertical spectral ratio (HVSr) analysis of the passive seismic data on alluvial lithology: an example from Bandung Basin Rim. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*. 2023. Vol. 9. No. 1. pp. 402–411. DOI: 10.29303/jppipa.v9i1.2962.
15. Gallipoli M.R., Mucciarelli M., Sket-Motnikar B., Zupancic P., Gosar A., Prevolnik S., Herak M., Stipcevic J., Herak D., Milutinovic Z., Olumceva T. Empirical estimates of dynamic parameters on a large set of European buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2010. Vol. 8. No. 3. pp. 593–607. DOI: 10.1007/s10518-009-9133-6.
16. Giacomo D., Gallipoli M.R., Mucciarelli M., Parolai S., Richwalski S.M. Analysis and modeling of HVSr in the presence of a velocity inversion: the case of Venosa, Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2005. Vol. 95. No. 6. pp. 2364–2372.
17. Irie Y., Nakamura Y. Dynamic characteristics of a RC building of five stories based on microtremor measurements and earthquake observations. In: *12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland. New Zealand. 2000. Art. No. 1747.
18. Kapustian N., Antonovskaya G., Agafonov V., Neumoin K., Safonov M. Seismic monitoring of linear and rotational oscillations of the multistory buildings in Moscow. *Seismic Behavior of Irregular and Complex Structures. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*. 2013. Vol. 24. pp. 353–363.
19. Kawase H., Nagashima F., Matsushima S., Sanchez-Sesma F.J. Application of horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratios for both microtremors and earthquake motions based on the diffuse field theory. In: *10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering (10NCEE)*. Anchorage, Alaska, USA. 2014. 10 p.
20. Mucciarelli M., Gallipoli M.R., Arcieri M. The stability of the horizontal-to-vertical spectral ratio of triggered noise and earthquake recordings. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2003. Vol. 93. pp. 1407–1412.
21. Nakamura Y. Seismic vulnerability indices for ground and structures using microtremor. In: *World Congress on Railway Research*. Florence, Italy. 1997. pp. 1–7.
22. Nakamura Y. What is the Nakamura method? *Seismological Research Letters*. 2019. Vol. 90. No. 4. pp. 1437–1443. DOI: 10.1785/0220180376.
23. Nakamura Y., Gurler E.D., Saita J., Rovelli A., Donati S. Vulnerability investigation of Roman Colosseum using microtremor. In: *12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland. New Zealand. 2000. Art. No. 2660.
24. Sungkono, Warnana D., Triwulan, Utama W. Evaluation of buildings strength from microtremor analyses. *International Journal of Civil and Environmental Engineering IJCEE-IJENS*. 2011. Vol. 11. pp. 108–114.

УДК 550.3

DOI: 10.46698/VNC.2026.38.50.001

Оригинальная статья

Идентификация сейсмофациальных тел на основе частотно-временных атрибутов и самоорганизующихся карт Кохонена

Р.И. Меликов[✉], Г.Р. Бабаев[✉]

Институт геологии и геофизики, Министерство науки и образования Азербайджанской Республики, Республика Азербайджан, AZ1073, г. Баку, пр. Г. Джавида, 119,
e-mail: ruslan.m08@outlook.com, babayev74@gmail.com

Статья поступила: 13.01.2026, доработана: 11.05.2026, принята к публикации: 14.05.2026

Резюме: Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения надёжности и воспроизводимости сейсмофациальной интерпретации в сложных условиях осадконакопления, где традиционные методы, основанные преимущественно на амплитудных атрибутах и ручном подборе частотных полос, нередко оказываются недостаточно эффективными при выявлении слабовыраженных литолого-стратиграфических изменений и существенно зависят от субъективных решений интерпретатора. **Целью исследования** является разработка и апробация интегрированного алгоритма трёхмерной кластеризации сейсмических фаций, обеспечивающего автоматизированное выделение объёмных геологических тел на основе многополосных частотных атрибутов сейсмических данных. Методами исследования служит вейвлет-преобразование, реализованное в форме непрерывного вейвлет-преобразования, для спектрального разложения сейсмического сигнала и формирования набора частотно-временных атрибутов, а также использования карт Кохонена для кластеризации многомерных данных с сохранением топологической структуры признакового пространства. Обученная самоорганизующаяся карта далее применяется к трёхмерному сейсмическому кубу, обеспечивая выделение сейсмофациальных тел. **Результаты исследования** на материалах Южно-Каспийского бассейна, показывают, что предложенный подход позволяет эффективно идентифицировать меандрирующие русловые тела, прирусловые валы и стратиграфические границы, обеспечивая построение трёхмерных фациальных моделей. В целом предложенный метод снижает интерпретационную субъективность, повышает надёжность и воспроизводимость результатов и может быть эффективно использован при решении задач коллекторской характеристики, планировании геологоразведочных работ и оценке запасов углеводородов.

Ключевые слова: сейсмофации, сейсмофациальный анализ, геологические тела, частотно-временные атрибуты, непрерывное вейвлет-преобразование, самоорганизующиеся карты Кохонена, обучение без учителя, машинное обучение.

Для цитирования: Меликов Р.И., Бабаев Г.Р. Идентификация сейсмофациальных тел на основе частотно-временных атрибутов и самоорганизующихся карт Кохонена. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 71–84. DOI: 10.46698/VNC.2026.38.50.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.38.50.001

Original paper

Identification of seismic facies objects using time-frequency attributes and self-organizing neural networks

R.I. Malikov[✉], G.R. Babayev[✉]

Institute of Geology and Geophysics, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, 119 H. Javid Ave., Baku AZ1073, Azerbaijan,
e-mail: ruslan.m08@outlook.com, babayev74@gmail.com

Received: 13.01.2026, revised: 11.05.2026, accepted: 14.05.2026

Abstract: The relevance of this work is driven by the need for more reliable and reproducible seismic facies interpretation in complex depositional settings, where conventional methods are primarily based on amplitude attributes and manual selection of frequency bands that are often insufficient for detecting subtle geological variations and largely depend on subjective interpreter decisions. **Aim of the study** is to develop and validate an integrated workflow for three-dimensional seismic facies clustering that enables automated delineation of volumetric geological bodies using multi-frequency attributes derived from seismic data. **Research methods** include application of continuous wavelet transform for spectral decomposition of the seismic signal that creates a multi-frequency feature data set, as well as the use of Kohonen maps for clustering high-dimensional data while preserving their topological relationships. The trained self-organizing map is then applied to the 3D seismic volume, enabling delineation and extraction of volumetric geological objects. **Results** show that the proposed approach effectively identifies meandering channel bodies, levee deposits, and stratigraphic boundaries, when applied to data from the South Caspian Basin and provides three-dimensional facies modeling. Overall, the method reduces interpretational subjectivity, improves the reliability and reproducibility of results, and offers advantages for reservoir characterization, exploration activities, and resource estimation.

Keywords: seismic facies, seismofacial analysis, geological bodies, frequency-time attributes, continuous wavelet transform, Kohonen self-organizing maps, unsupervised learning, machine learning.

For citation: Malikov R.I., Babayev G.R. Identification of seismic facies objects using time-frequency attributes and self-organizing neural networks. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 71–84. DOI: 10.46698/VNC.2026.38.50.001

Введение

Точная классификация сейсмofаций является основополагающим этапом для интерпретации недр, поскольку она дает представление о процессах осадконакопления, распределении литологических типов и потенциале коллектора [Posamentier, Kolla, 2003; Interpretation ..., 2011; Samakinde et al., 2020; Owusu et al., 2025]. Процедура предполагает объединение сейсмических откликов на основе их амплитуды, непрерывности и частотных свойств для выделения таких седиментационных элементов, как русловые тела, прирусловые валы, веерообразные песчано-алевритовые образования и карбонатные сооружения [Chopra, Marfurt, 2007]. Кроме разведки углеводородов, подобные классификации применяются для анализа бассейнов [Nanda, 2021] и оценки геологических рисков [Sukmono et al., 2017].

Традиционный подход к интерпретации сейсмических фаций основывался на визуальном анализе формы и амплитуд отражений с привлечением данных скважин [Interpretation ..., 2011]. Внедрение сейсмических атрибутов позволило перейти к ко-

личественному анализу более высокого уровня, учитывающему амплитуду, кривизну и фазу сейсмического отклика [Chopra, Marfurt, 2007]. Алгоритмы, ориентированные главным образом на амплитудные характеристики, часто не выявляют мелкие стратиграфические изменения, особенно если они выражаются в частотной области. В областях со сложной стратиграфической структурой сейсмические отклики отличаются высокой неоднородностью и неоднозначностью, что приводит к тому, что небольшие геологические различия могут оставаться нераспознанными при использовании традиционных амплитудно-ориентированных методов интерпретации.

Методы спектрального разложения, такие как оконное преобразование Фурье (ОПФ) [Partyka et al., 1999], S-преобразование и вейвлет-преобразование (ВП) [Castagna et al., 2003; Sinha et al., 2005], существенно преобразили стратиграфический анализ, позволяя представлять сейсмические данные в частотно-временной области. ОПФ являлось одним из первых распространённых методов, но постоянный размер окна ограничивает одновременно точность по времени и по частоте. В отличие от него, ВП стало одним из наиболее распространенных инструментов в стратиграфическом анализе [Castagna et al., 2003; Sinha et al., 2005]. Его способность обнаруживать тонкие спектральные изменения используется для выявления русловых тел, картирования карбонатных рифов и определения аномалий, связанных с углеводородным распределением в различных осадочных обстановках [Kazemeini et al., 2008; Von Hartmann et al., 2012]. Тем не менее, хотя эти методы повышают разрешающие способности сейсмических данных, они генерируют многомерные наборы данных, что затрудняет их визуальную и ручную интерпретацию.

В то же время применение автоматизированных технологий, машинного обучения и нейросетевых алгоритмов при построении геологических моделей рассматривается как одно из перспективных направлений повышения достоверности интерпретации геолого-геофизических данных [Потехин, Галкин, 2023; Эзирбаев, 2025]. В частности, методы машинного обучения зарекомендовали себя как эффективные инструменты для классификации сейсмических фаций. Самоорганизующиеся карты Кохонена (СОК), основанные на алгоритмах кластеризации без учителя, снижают размерность данных, проецируя многомерные векторы признаков на двумерную нейронную сетку и выявляя структуры данных, которые могут оставаться незамеченными при традиционной интерпретации [Kourki, Riahi, 2014; Roden et al., 2015; Zhao et al., 2015; Приезжев и др., 2020; Никулин, Самсонов, 2021]. Изначально применение самоорганизующихся карт ограничивалось двумерным анализом отдельных горизонтов, что ограничивало геологическую интерпретацию стратиграфическими срезами. Современные методы расширяют СОК на трёхмерные сейсмические объёмы, позволяя формировать геологические тела, более полно отражающие строение и связность коллекторов. Однако вопрос об оптимальном объединении спектральных данных сейсмического сигнала и алгоритмов машинного обучения для сохранения интерпретируемости всё ещё остаётся открытым. Подобный подход к интеграции спектрального разложения с методами обучения без учителя был реализован в исследовании Меликова и Бабаева [Malikov, Babayev, 2025]. В этой работе частотные атрибуты, полученные с использованием непрерывного вейвлет-преобразования (НВП), были совместно проанализированы с кластеризацией СОК, что позволило выделить русловые системы и фациальные границы в Южно-Каспийском бассейне (ЮКБ). Результаты их работы показали, что сочетание многополосного разложения с классификацией без учителя улучшает выявляемость меандрирующих русел и внутренней структурной изменчивости, одновременно уменьшая субъективность интерпретации. Основываясь на этих выводах, настоящее исследование расширяет данный подход от анализа отдельных горизонтов к полноценной объёмной кластеризации, позволяющей извлекать трехмерные геологические тела и выполнять количе-

ственное фациальное моделирование. Такой переход предоставляет более целостное понимание строения коллектора и характера его связанности.

По сравнению с альтернативными методами, СОК обладают рядом специфических преимуществ. Так, хотя алгоритм *k*-средних отличается высокой вычислительной эффективностью, он предполагает сферичность кластеров и одинаковую дисперсию, что нередко чрезмерно упрощает представление об изменчивости сейсмических фаций [Zhao et al., 2015]. Метод главных компонент (МГК) широко используется для снижения размерности, но фиксирует лишь линейные зависимости и может пропускать нелинейные связи, имеющие ключевое значение для стратиграфической интерпретации [Das et al., 2016]. Подходы с учителем, такие как метод опорных векторов или случайные леса, требуют обширных размеченных данных, которые редко присутствуют в сейсмических задачах, а их результаты могут наследовать субъективность интерпретатора [Zhu et al., 2022]. За последнее десятилетие глубокие нейронные сети, особенно сверточные нейронные сети, продемонстрировали высокий потенциал в выявлении сложных пространственных закономерностей; однако им свойственны высокая потребность в размеченных данных, значительные вычислительные затраты и ограниченная интерпретируемость из-за так называемой природы «чёрного ящика» [Rudin, 2019]. На этом фоне СОК выделяются возможностью объединять уменьшение размерности, обучение без учителя и наглядность результатов, что делает их особенно удобными для анализа сейсмических фаций в условиях отсутствия размеченных данных [Zhu et al., 2022; Samuel et al., 2025].

В работе предложено решение поставленных задач, основанное на комплексном использовании спектрального разложения сейсмического сигнала методом НВП и кластеризации многомерных данных с применением СОК, что обеспечивает построение трёхмерных моделей сейсмофаций. Апробация разработанного алгоритма на материалах ЮКБ показала, что формируемые фациальные кластеры могут быть представлены в виде карт распределения и интерпретированы как трёхмерные сейсмогеологические тела. Полученные результаты свидетельствуют о том, что интеграция частотно-временного анализа с методами обучения без учителя способствует повышению разрешающей способности геологической интерпретации и снижению влияния субъективного фактора. Это обеспечивает более надёжную основу для прогноза коллекторских свойств и оценки запасов углеводородов.

Материалы и методы

Предложенный подход сочетает многополосное спектральное разложение с кластеризацией, основанной на СОК, что позволяет сформировать объёмную классификацию сейсмических фаций. Этот метод развивает более ранние решения, в которых НВП совместно с СОК применялись для кластеризации фаций по горизонтам в пределах ЮКБ [Malikov, Babayev, 2025].

Процесс начинается с загрузки трехмерного сейсмического объема и доступных структурных или стратиграфических горизонтов. В отличие от классических подходов, которые зависят от точной интерпретации горизонтов для корректного извлечения атрибутов, эта методика допускает использование лишь приблизительных ограничивающих поверхностей, при условии, что они охватывают требуемый стратиграфический интервал.

На предварительном этапе могут применяться методы, такие как автоматическая регулировка усиления (АРУ), для уменьшения амплитудной изменчивости, вызванной артефактами съемки или эффектами, связанными с присутствием углеводородов [Yilmaz, 2001]. Эта подготовка выравнивает амплитудные колебания, обеспечивая, чтобы последующая кластеризация основывалась преимущественно на геологических характеристиках, а не на особенностях сбора данных или влиянии флюидов.

После предварительной подготовки объема применяется спектральное разложение для генерации узкополосных частотных представлений сейсмических данных. Техника НВП выбрана из-за ее гибкости и лучшего частотно-временного разрешения. Для сейсмической трассы, $s(t)$, НВП определяется как:

$$X(a, b) = \frac{1}{|a|^{\frac{1}{2}}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

где a – параметр масштаба (обратно пропорциональный частоте), $\psi(t)$ – материнский вейвлет, b – сдвиг во времени. В данном алгоритме выбран вейвлет Рикера [Wang, 2015] из-за его сходства с сейсмическими вейвлетами с нулевой фазой.

Изменение параметра масштаба a в НВП позволяет разлагать сейсмический сигнал на серию частотных полос. Например, разложение от 5 Гц до 60 Гц с шагом 2 Гц: этот широкий диапазон обеспечивает представление как крупномасштабных стратиграфических объектов, таких как широкие клиноформы (косозалегающие слоистые структуры осадочных пород), так и мелкомасштабных, таких как тонкие русловые отложения (осадочные породы, накопившиеся в пределах речных или подводных каналов) [Owusu et al., 2025]. Каждое разложение создает отдельный амплитудный объем, соответствующий конкретной частотной полосе, и вместе они формируют многомерный набор частотно-зависимых амплитуд. Результаты спектрального анализа преобразуются для дальнейшей обработки таким образом, чтобы каждый отсчёт трехмерного сейсмического куба представлялся многомерным вектором спектральных амплитуд. Данные вектора объединяются в кластеры с использованием алгоритма СОК, представляющего собой двумерную сетку нейронов, где каждый нейрон имеет вектор весов такой же размерности, как и входные данные.

Обучение СОК происходит итеративным путем. Изначально каждому нейрону в сетке СОК присваивается случайный вектор весов, совпадающий по размерности с входными данными. На каждой итерации выбирается случайный входной вектор, который затем сравнивается со всеми нейронами для определения лучшей единицы соответствия – нейрона, чей вектор весов максимально близок к входному. Для количественной оценки схожести используется метрика Евклидова расстояния:

$$d_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - w_{ij})^2} \quad (2)$$

где n – количество частотных диапазонов, x_i – компоненты входного вектора, w_{ji} – веса нейрона j .

После определения лучшей единицы соответствия его вектор весов корректируется для большего сходства с входным вектором, а соседние нейроны обновляются в меньшей степени согласно функции соседства:

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \lambda(t)h(t, w_i(t))[x - w_i(t)] \quad (3)$$

где $\lambda(t)$ – скорость обучения, h – функция соседства, которая экспоненциально уменьшается с расстоянием от лучшей единицы соответствия. В ходе последовательных итераций скорость обучения и радиус соседства уменьшаются, что позволяет СОК постепенно сходиться к стабильному состоянию, которое отражает спектральную изменчивость набора данных.

В результате обучения СОК формируется двумерная карта, отражающая разнообразие спектральных шаблонов, содержащихся в данных, при этом каждый нейрон представляет собой обобщенный частотный профиль. Далее расчетные ячейки трехмерного сейсмического куба классифицируются по принципу наилучшего соответствия их частотно-зависимого амплитудного отклика вектору весов нейрона. В итоге получается трёхмерный сейсмический объём с кластеризацией, где каждая расчетная ячейка сейсмического куба отнесена к конкретному классу фаций.

Результаты и обсуждение

Предложенный алгоритм был применен к сейсмическому набору данных после суммирования из ЮКБ, характеризующегося быстрым накоплением отложений, сложной архитектурой отложений и значительным потенциалом углеводородов. Географически ЮКБ расположен к востоку от Азербайджана, к западу от Туркменистана и к северу от Ирана; он состоит, в основном, из отложений третичного возраста с толщиной осадков до 20 км, характеризуется низкой уплотненностью, низким геотермальным градиентом и аномально высокими пластовыми давлениями [Smith-Rouch, 2006; Kaz'min, Verzhbitskii, 2011].

Структурно-стратиграфическая основа бассейна сформирована обширным дельтовым поступлением, проседанием дна и выраженной тектонической активностью с миоцена. В этот период основной приток отложений обеспечивали системы Палео-Амударья и Палео-Волга, а также реки Палео-Кура и Палео-Сефид-Руд. Несмотря на то, что в настоящее время бассейн является глубоководным, значительная часть отложений плиоцена и раннего плейстоцена формировалась в условиях мелководного осаднения, завершающей стадией формирования которого стал региональный клиноформный горизонт Абшеронского этапа в нижнем плейстоцене, последовательность, представленная в основном сланцами с прослойками мергеля и песчаников. В общем, ЮКБ характеризуется сложным геодинамическим строением, высокой мощностью осадочного чехла и значительным нефтегазовым потенциалом, что подтверждается результатами комплексного анализа геофизических, сейсмологических и геодинамических данных [Yetirmishli et al., 2025].

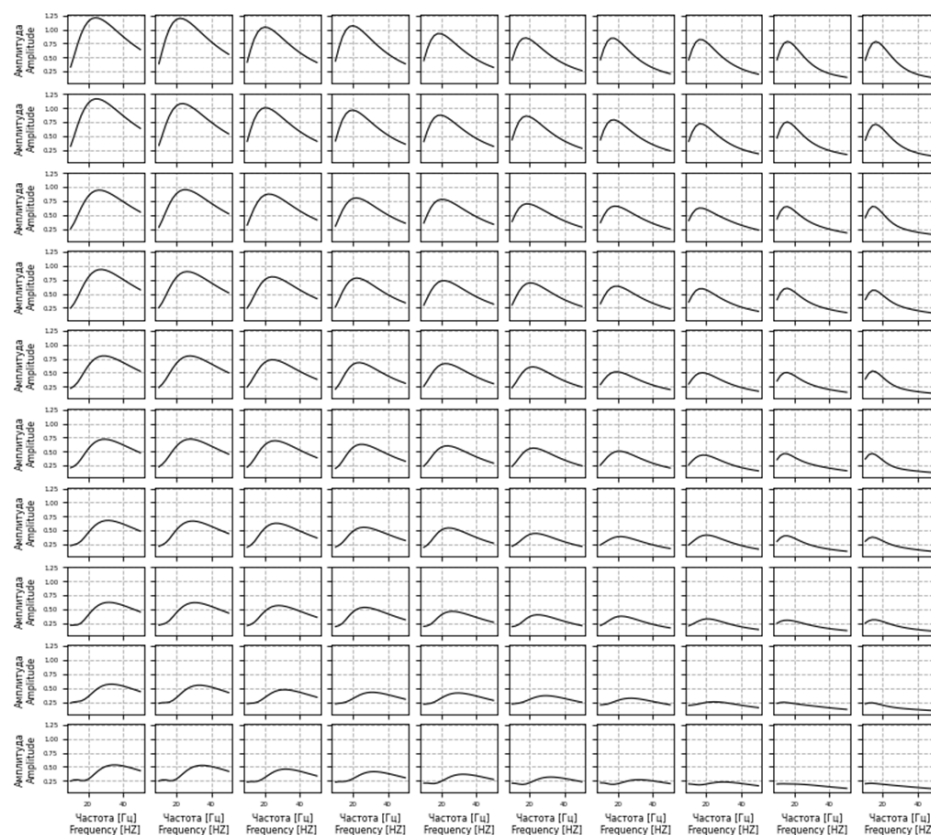


Рис. 1. Сетка СОК с 10×10 топологией, где каждая ячейка – это обобщенная амплитудно-частотная характеристика, полученная после обучения. Все графики имеют общие оси x и y /

Fig. 1. SOM grid with 10×10 topology, where each cell is a generalized amplitude-frequency characteristic obtained after training. All graphs have common x and y axes

В рамках данного геологического контекста предложенный алгоритм был применен для генерации кластерных сейсмических объёмов и выделения трёхмерных фациальных тел, что позволяет получить более детальное стратиграфическое и коллекторское описание. В пределах исследуемой области на основе сейсмических данных было выявлено, что в целевом стратиграфическом интервале преобладают дельтовые и речные системы. Спектральное разложение в диапазоне частот 10–50 Гц с шагом 2 Гц, за которым последовала обработка с помощью СОК, позволило получить сетку 10×10 с обобщёнными частотными закономерностями (рис. 1). Средний частотный спектр сейсмических данных в пределах целевого интервала использовался в качестве основы для определения частотного диапазона, заданного полосой пропускания на уровне -10 дБ (рис. 2). Для отображения результатов СОК с большим количеством кластеров используется двумерная цветовая схема. В этой цветовой схеме каждому кластеру присваивается уникальный цвет, отражающий полученный обобщённый образец амплитудно-частотного изменения сейсмического сигнала, который он представляет в пространстве СОК. Далее обученная модель была применена к целевому сейсмическому объёму, преобразуя отдельные точки выборки в соответствующие кластеры СОК. Полученные кластеры визуализируются посредством окрашивания каждой расчетной ячейки сейсмического куба в цвет, соответствующий его кластеру, что позволяет выявлять пространственные структуры и взаимосвязи.

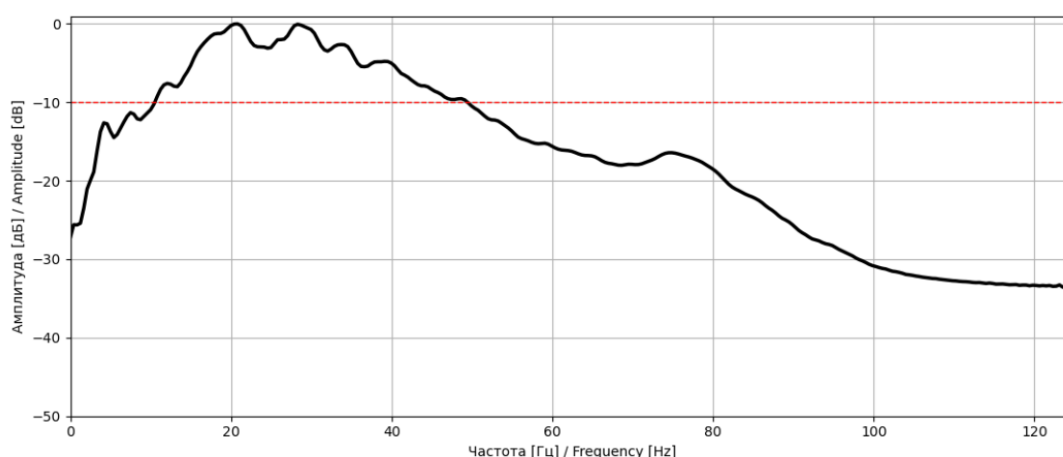


Рис. 2. Средний частотный спектр сейсмических данных для области исследования с красной пунктирной линией, указывающей полосу пропускания на уровне -10 дБ /

Fig. 2. Mean frequency spectrum of seismic data for the area of interest with a red dotted line indicating the seismic bandwidth at -10 dB

На рисунке 1, демонстрирующем сетку СОК, наблюдаются систематические изменения в спектральных характеристиках кластеров. В частности, доминирующая частота в целом возрастает снизу вверх по сетке, а также справа налево, тогда как максимальная амплитуда уменьшается от правого верхнего угла к левому нижнему. При этом частотно-амплитудные структуры постепенно изменяются от узла к узлу, отражая непрерывный спектр осадочных и литологических вариаций, присутствующих в сейсмических данных. Такое распределение в пространстве СОК показывает, как алгоритм сохраняет геологическую непрерывность, преобразуя сейсмический сигнал в значимые кластеры, которые затем могут быть обратно интегрированы в сейсмический объём. Анализируя карту СОК вместе с кластеризованным объёмом, интерпретаторы получают возможность напрямую сопоставлять спектральные атрибуты с геологическими фациями, превращая абстрактные частотные данные в инструмент для классификации фаций и изучения процессов осадконакопления.

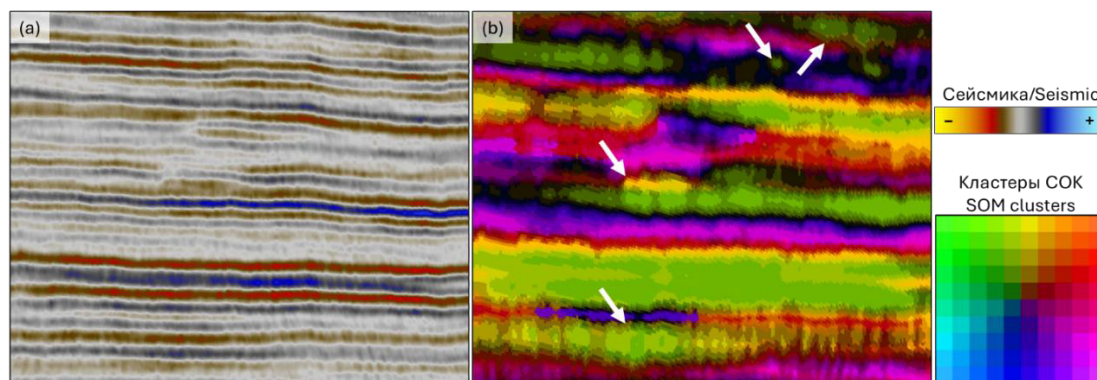


Рис. 3. Сравнение профилей временного сейсмического разреза (а) с результатами кластеризации объёма СОК (b). Стрелки указывают кластеры, соответствующие руслам /

Fig. 3. Comparison of time seismic section profiles (a) and the results of SOM volume clustering (b). Arrows indicate clusters corresponding to channels

На рисунке 3 представлено сопоставление сейсмического временного профиля с кластеризованным отображением исследуемой зоны. На сейсмическом профиле отражения имеют переменную амплитуду, что затрудняет интерпретацию тонких особенностей осадочных пород и усложняет стратиграфическую интерпретацию. Напротив, кластерное представление, полученное с помощью предлагаемой методики, выделяет фации в отдельные кластеры, которые соответствуют геологически последовательным моделям. Стрелки на рисунках указывают на систему русел, характеризующуюся сейсмическими откликами высокой амплитуды, которые четко разделены на отдельные кластеры. Сопоставление сейсмического разреза с его кластеризованным представлением иллюстрирует способность методики преобразовывать сложные сейсмические сигналы в удобную для интерпретации модель фаций.

На рисунке 4 на картах кластеров отчётливо прослеживаются извилистые русловые тела с выраженной меандровой формой и преимущественной ориентацией с севера на юг в обеих основных системах русел.

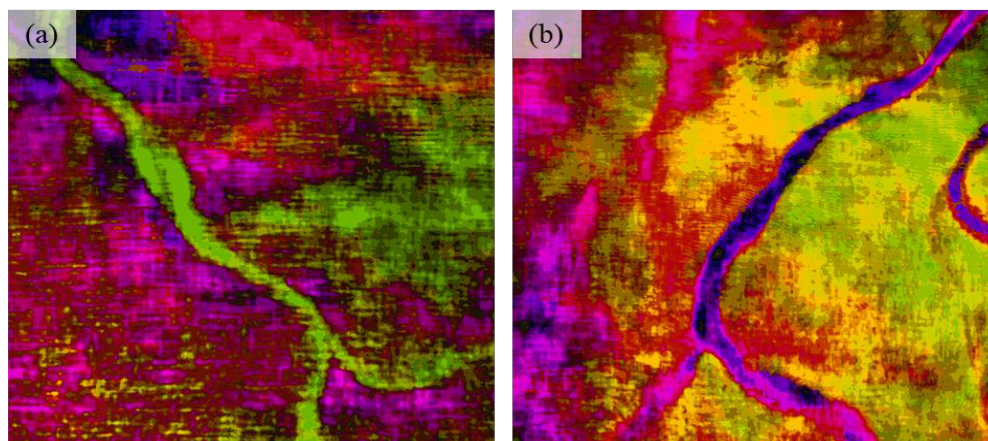


Рис. 4. Стратиграфические карты, извлеченные из кластеризованного сейсмического объема после применения СОК: (а) первая стратиграфическая единица; (b) вторая стратиграфическая единица /

Fig. 4. Stratigraphic maps extracted from the clustered seismic volume after the SOM application: (a) first stratigraphic unit; (b) second stratigraphic unit

Включение высокочастотных компонентов повышает детализацию этих структур, позволяя более чётко выделять мелкие притоки. Существенным преимуществом

кластерного подхода является его способность выявлять чёткие границы фаций, что обеспечивает точное определение границ русел. В то же время метод сохраняет внутреннюю неоднородность русел, что является ключевым для точной оценки объёмов. Такие особенности позволяют получить более детальное представление о строении русловых тел и распределении фаций, подчёркивая ценность данного подхода для геологического анализа.

В итоге, объединяя кластеры, соответствующие фациям русловых тел, создаётся единый класс русел, который можно ясно выделить на фоне окружающих осадочных фаций (рис. 5). Такая интеграция позволяет извлечь непрерывные системы русел из кластеризованного объёма, эффективно отделяя их от пойменных, прируслово-вальных и отложений с низкой коллекторской способностью. Полученная классификация служит основой для построения трёхмерных геологических тел, отражающих структуру русел. Эти тела демонстрируют как пространственное распределение, так и вертикальные схемы осадконакопления русел, обеспечивая объёмное представление их характеристик на масштабе месторождения.

Помимо точного выделения русел и пойменных фаций, предложенная методика продемонстрировала способность выявлять переходные зоны, внутреннюю неоднородность русловых тел и тонкие границы осадков, которые обычно остаются незамеченными на традиционных сейсмических разрезах. Трёхмерное извлечение русловых тел демонстрирует практическую ценность метода для моделирования пластов и оценки запасов, предоставляя интерпретаторам геологически согласованные характеристики, пригодные для непосредственной количественной оценки. Для обеспечения геологической достоверности рабочий процесс требует внимательного подбора параметров, таких как диапазон частот, размер сетки СОК и этап интеграции после кластеризации. Несмотря на то, что данный метод уменьшает субъективность интерпретатора благодаря автоматизации классификации фаций, участие эксперта-геолога по-прежнему необходимо для проверки результатов и интеграции сгруппированных геологических тел в модели недр. Эти результаты подчёркивают, что кластеризация на основе машинного обучения не заменяет геологическую интерпретацию, а выступает её дополнением, повышая эффективность, воспроизводимость и точность анализа.

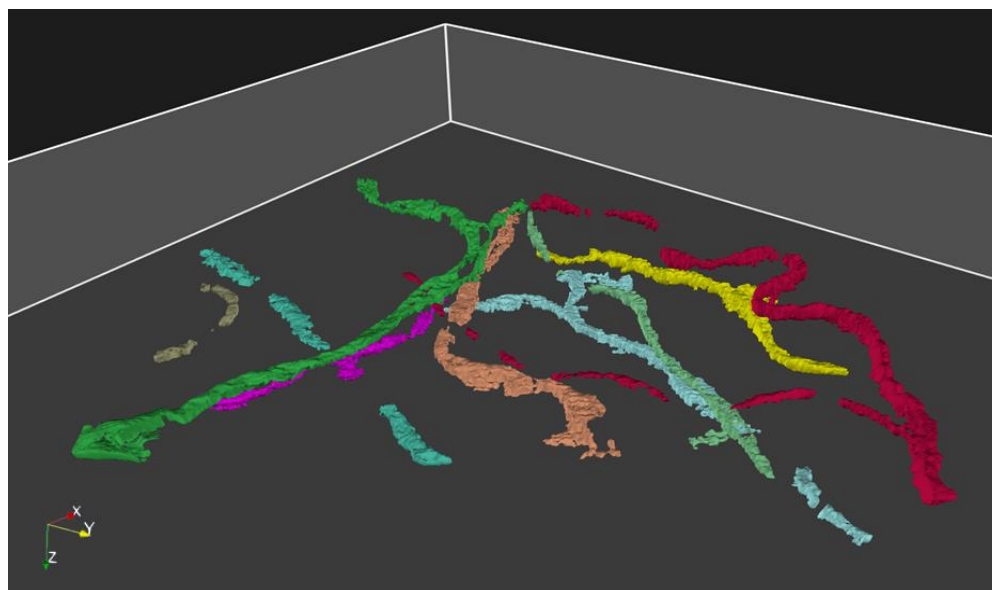


Рис. 5. Извлеченные трехмерные русловые тела из кластеризованного объема СОК.

Различные цвета обозначают отдельные русловые системы /

Fig. 5. Extracted three-dimensional channel geological bodies from the clustered SOM volume.

Different colors indicate separate channel systems

Интеграция НВП и СОК, представленная в данном исследовании для трёхмерной классификации сейсмических фаций, формирует устойчивый и результативный метод количественной оценки коллекторских свойств. Предложенная методика позволяет эффективно выявлять тонкие стратиграфические вариации в сложных осадочных обстановках, включая ЮКБ. Результаты демонстрируют три существенных преимущества по сравнению с существующими подходами: более высокое геологическое разрешение, уменьшение субъективности интерпретации и возможность количественного описания геологических тел.

Повышенное геологическое разрешение очевидно при сравнении исходных сейсмических данных и объема, сгруппированного с помощью СОК (рис. 3). Традиционные сейсмические профили, хотя и показывают широкие отражающие структуры, маскируют мелкомасштабную архитектуру речно-дельтовых систем. В отличие от этого, кластеризация СОК, обученная на многомерном массиве частотно-зависимых амплитуд из НВП, успешно разделяет отдельные сейсмические фации. Стрелки на рисунке 3 четко обозначают системы каналов, которые визуальнo неразличимы в необработанных сейсмических данных. Это является прямым следствием способности НВП выявлять тонкие спектральные изменения, связанные с вариациями литологии, толщины и содержания жидкости, а также способности СОК сгруппировать эти многомерные признаки в интерпретируемые классы. Полученная фациальная модель представляет собой не просто интерпретацию исходных данных, а отражает реальную геологическую архитектуру, которую было бы крайне трудно воспроизвести вручную или посредством базового атрибутивного анализа.

Ручная интерпретация фаций по своей сути субъективна, поскольку опирается на опыт интерпретатора и ограниченное количество визуальных атрибутов. Алгоритм СОК, напротив, обеспечивает объективную и воспроизводимую классификацию каждой расчетной ячейки трехмерного сейсмического куба на основе его всестороннего спектрального профиля. Систематические вариации частотно-амплитудных характеристик вдоль сетки СОК (рис. 1) отображают непрерывный спектр геологических изменений в бассейне, от высокоамплитудных русловых заполнений до низкоамплитудных пойменных отложений.

Эта классификация без учителя существенно снижает вероятность пропуска мелких, но важных стратиграфических деталей и обеспечивает согласованность как между крупными массивами данных, так и между разными интерпретаторами. Несмотря на то, что окончательное геологическое обозначение кластеров всё ещё требует экспертной оценки, предварительная кластеризация, основанная на данных, формирует надёжную и объективную основу для дальнейшей интерпретации.

В итоге, наиболее значимым практическим результатом применения этой методологии является возможность извлечения трехмерных геотел непосредственно из кластеризованного объема (рис. 5). В отличие от двухмерных горизонтальных срезов (рис. 4), которые лишь частично передают пространственную непрерывность, трёхмерные геологические тела позволяют полностью отразить сложную структуру русловых тел, их наложение, извилистость и степень связности. Такие объёмные представления могут непосредственно использоваться при построении статических и динамических моделей месторождений. Возможность количественно оценивать размеры, извилистость и взаимные связи этих тел формирует более точную основу для расчёта запасов и выбора оптимальных схем размещения скважин.

При рассмотрении результатов следует учитывать существующие ограничения и направления для дальнейших исследований. Эффективность рабочего процесса во многом определяется правильным подбором параметров, таких как диапазон частот для НВП и размеры сетки СОК. В настоящем исследовании средний анализ частот-

ного спектра (рис. 2) служит эмпирической основой для их выбора, однако последующие работы могут сосредоточиться на разработке более сложных методов оптимизации этих параметров.

Заключение

В настоящей работе представлен алгоритм объёмной классификации сейсмофаций, основанный на интеграции НВП и СОК. Использование указанных методов обеспечивает переход от качественной интерпретации сейсмических данных, базирующейся на амплитудных атрибутах, к количественной интерпретации на основе спектральных (частотно-временных) атрибутов сейсмического сигнала.

Апробация метода на материалах ЮКБ показала его высокую эффективность при изучении строения руслово-дельтовых комплексов. НВП обеспечивает спектральное разложение сейсмического сигнала с формированием системы частотно-временных атрибутов, тогда как СОК реализует кластеризацию многомерных данных с сохранением их топологической структуры и выделением геологически интерпретируемых сейсмофаций. Применение предложенного подхода способствует повышению разрешающей способности сейсмических данных и позволяет выявлять тонкие литолого-стратиграфические элементы, включая различные типы русловых тел и ассоциированные с ними отложения, слабо выраженные при традиционной интерпретации.

Автоматизированный характер кластеризации, основанный на применении СОК, снижает влияние субъективного фактора интерпретатора и обеспечивает воспроизводимость результатов в пределах всего сейсмического объёма. Это создаёт надёжную основу для последующего геологического анализа. Важным результатом является возможность количественной характеристики трёхмерных сейсмофациальных тел, адекватно отражающих внутреннее строение резервуара, включая его связность и вертикальную неоднородность. Полученные геологические тела могут рассматриваться как самостоятельный результат интерпретации и использоваться при построении геологических и гидродинамических моделей залежей углеводородов, что способствует повышению достоверности оценки запасов и эффективности проектирования разработки месторождений.

Литература

1. Никулин И.И., Самсонов А.А. Нейросетевой кластерный анализ площадных геофизических данных рудоносного Хибино-Ловозёрского вулcano-плутонического комплекса (Кольский п-ов) методом самоорганизующихся карт Кохонена // Геофизические исследования. – 2021. – Т. 22. № 1. – С. 25–39. DOI: 10.21455/gr2021.1-2.
2. Потехин Д.В., Галкин С.В. Применение технологии машинного обучения при моделировании распределения литотипов на пермокарбоновой залежи нефти Усинского месторождения // Записки Горного института. – 2023. – Т. 259. – С. 41–51. DOI: 10.31897/PMI.2022.101.
3. Приезжев И.И., Васильев М.А., Петренко Е.Н. Построение прогнозных карт эффективных газонасыщенных толщин по форме сейсмического сигнала на основе нейронных сетей Кохонена // Геофизика. – 2020. – № 6. – С. 49–53.
4. Эзирбаев Т.Б. Нижнемеловая залежь Старогрозненского нефтегазового месторождения как объект геологического моделирования // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 3. – С. 239–254. DOI: 10.46698/VNC.2025.27.39.001.
5. Castagna J.P., Sun S., Siegfried R.W. Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons // The Leading Edge. – 2003. – Vol. 22. No. 2. – pp. 120–127. DOI: 10.1190/1.1559038.
6. Chopra S., Marfurt K.J. Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization. Tulsa, OK, USA: Society of Exploration Geophysicists, 2007. – 464 с. DOI: 10.1190/1.9781560801900.

7. Das G., Chattopadhyay M., Gupta S. A comparison of self-organising maps and principal components analysis. *International // Journal of Market Research*. – 2016. – Vol. 58. No. 6. – pp. 815–834. DOI: 10.2501/ijmr-2016-039.
8. Interpretation of three-dimensional seismic data / Ed. A.R. Brown. – 2011. – Vol. 42. DOI: 10.1306/M4271346.
9. Kaz'min V.G., Verzhbitskii E.V. Age and origin of the South Caspian Basin // *Oceanology*. – 2011. – Vol. 51. Issue 1. – pp. 131–140. DOI: 10.1134/s0001437011010073.
10. Kazemeini S.H., Juhlin C., Zinck-Jorgensen K., Norden B. Application of the continuous wavelet transform on seismic data for mapping of channel deposits and gas detection at the CO2SINK site, Ketzin, Germany // *Geophysical Prospecting*. – 2008. – Vol. 57. No. 1. – pp. 111–123. DOI: 10.1111/j.1365-2478.2008.00723.x.
11. Kourki M., Riahi M.A. Seismic facies analysis from pre-stack data using self-organizing maps // *Journal of Geophysics and Engineering*. – 2014. – Vol. 11. No. 6. – Art. No. 065005. DOI: 10.1088/1742-2132/11/6/065005.
12. Malikov R., Babayev G. Applying spectral decomposition to seismic facies clustering with unsupervised machine learning // *Geofizicheskiy Zhurnal*. – 2025. – Vol. 47. Issue 3. DOI: 10.24028/gj.v47i3.320290.
13. Nanda N.C. Seismic data interpretation and evaluation for hydrocarbon exploration and production. In: *Advances in oil and gas exploration and production*. Switzerland: Springer Cham, 2021. – 304 p. DOI: 10.1007/978-3-030-75301-6.
14. Owusu P., Raef A., Sharaf E. Carbonate seismic facies analysis in reservoir characterization: a machine learning approach with integration of reservoir mineralogy and porosity // *Geosciences*. – 2025. – Vol. 15. No. 7. – Art. No. 257. DOI: 10.3390/geosciences15070257.
15. Partyka G., Gridley J., Lopez J. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization // *The Leading Edge*. – 1999. – Vol. 18. No. 3. – pp. 353–360. DOI: 10.1190/1.1438295.
16. Posamentier H.W., Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in Deep-Water settings // *Journal of Sedimentary Research*. – 2003. – Vol. 73. No. 3. – pp. 367–388. DOI: 10.1306/111302730367.
17. Roden R., Smith T., Sacrey D. Geologic pattern recognition from seismic attributes: Principal component analysis and self-organizing maps // *Interpretation*. – 2015. – Vol. 3. No. 4. SAE59–SAE83. DOI: 10.1190/int-2015-0037.1.
18. Rudin C. Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead // *Nature Machine Intelligence*. – 2019. – Vol. 1. No. 5. – pp. 206–215. DOI: 10.1038/s42256-019-0048-x.
19. Samakinde C.A., Van Bever Donker J.M., Durrheim R., Manzi M. Application of seismic stratigraphy in reservoir characterisation: a case study of the passive margin deposits of the northern Orange Basin, South Africa // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2020. – Vol. 11. No. 1. – pp. 45–61. DOI: 10.1007/s13202-020-01050-9.
20. Samuel S.A., Knapp C.C., Knapp J.H. Seismic facies classification of salt structures and sediments in the Northern gulf of Mexico using self-organizing maps // *Geosciences*. – 2025. – Vol. 15. No. 5. – Art. No. 183. DOI: 10.3390/geosciences15050183.
21. Sinha S., Routh P.S., Anno P.D., Castagna J.P. Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform // *Geophysics*. – 2005. – Vol. 70. No. 6. – pp. 19–25. DOI: 10.1190/1.2127113.
22. Smith-Rouch L.S. Oligocene–Miocene Maykop/Diatom Total Petroleum System of the South Caspian Basin Province, Azerbaijan, Iran, and Turkmenistan // *Bulletin*. – 2006. – No. 2201. Chapter I. – 27 p. DOI: 10.3133/b2201i.
23. Sukmono S., Machado V., Adelina R., Ambarsari D. Integration of 3D seismic attributes for preliminary shallow geohazard identification in deep water exploration area with no well data // *First Break*. – 2017. – Vol. 35. No. 8. DOI: 10.3997/1365-2397.35.8.89810.
24. Von Hartmann H., Buness H., Krawczyk C.M., Schulz R. 3-D seismic analysis of a carbonate platform in the Molasse Basin – reef distribution and internal separation with seismic attributes // *Tectonophysics*. – 2012. – Vol. 572–573. – pp. 16–25. DOI: 10.1016/j.tecto.2012.06.033.

25. Wang Y. Frequencies of the Ricker wavelet // *Geophysics*. – 2015. – Vol. 80. No. 2. – pp. A31–A37. DOI: 10.1190/geo2014-0441.1.
26. Yetirmishli G. J., Kazimova S. E., Samedzade A. V. Integrated application of geophysical methods in the South Caspian basin (based on the Bulla-Deniz oil and gas field) // *Geology and Geophysics of Russian South*. – 2025. – Vol. 15. No. 2. – pp. 142–154. DOI: 10.46698/VNC.2025.35.96.001.
27. Yilmaz O. Seismic data analysis. In: *Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*. Tulsa, OK, USA: Society of Exploration Geophysicists, 2001. – 1028 p. DOI: 10.1190/1.9781560801580.
28. Zhao T., Jayaram V., Roy A., Marfurt K.J. A comparison of classification techniques for seismic facies recognition // *Interpretation*. – 2015. – Vol. 3. No. 4. – pp. SAE29–SAE58. DOI: 10.1190/int-2015-0044.1.
29. Zhu Z., Chen X., Ren H., Tao L., Jiang J., Wang T., Cheng M., Ding S., Du R. Seismic facies analysis using the multiattribute SOM-K-Means clustering // *Computational Intelligence and Neuroscience*. – 2022. – pp. 1–11. DOI: 10.1155/2022/1688233.

References

1. Nikulin I.I., Samsonov A.A. Neural network cluster analysis of areal geophysical data of the Khibiny-Lovozero volcano-plutonic ore-bearing complex (Kola peninsula) by self-organizing maps of Kohonen method. *Geophysical Research*. 2021. Vol. 22. No. 1. pp. 25–39. DOI: 10.21455/gr2021.1-2. (In Russ.)
2. Potekhin D.V., Galkin S.V. Use of machine learning technology to model the distribution of lithotypes in the Permo-Carboniferous oil deposit of the Usinskoye field. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 259. pp. 41–51. DOI: 10.31897/PMI.2022.101. (In Russ.)
3. Priezzhev I.I., Vasilev M.A., Petrenko E.N. Construction of predictive maps of effective gas-saturated thicknesses using seismic waveform based on Kohonen neural networks. *Journal of Geophysics*. 2020. No. 6. pp. 49–53. (In Russ.)
4. Ezirbaev T.B. The Lower Cretaceous reservoir of the Starogroznenkoye oil and gas field as an object of geological modeling. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 3. pp. 239–254. DOI: 10.46698/VNC.2025.27.39.001. (In Russ.)
5. Castagna J.P., Sun S., Siegfried R.W. Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons. *The Leading Edge*. 2003. Vol. 22. No. 2. pp. 120–127. DOI: 10.1190/1.1559038.
6. Chopra S., Marfurt K.J. Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization. Tulsa, OK, USA. Society of Exploration Geophysicists. 2007. 464 c. DOI: 10.1190/1.9781560801900.
7. Das G., Chattopadhyay M., Gupta S. A comparison of self-organising maps and principal components analysis. *International Journal of Market Research*. 2016. Vol. 58. No. 6. pp. 815–834. DOI: 10.2501/ijmr-2016-039.
8. *Interpretation of three-dimensional seismic data*. Ed. A.R. Brown. 2011. Vol. 42. DOI: 10.1306/M4271346.
9. Kaz'min V.G., Verzhbitskii E.V. Age and origin of the South Caspian Basin. *Oceanology*. 2011. Vol. 51. Issue 1. pp. 131–140. DOI: 10.1134/s0001437011010073.
10. Kazemeini S.H., Juhlin C., Zinck-Jorgensen K., Norden B. Application of the continuous wavelet transform on seismic data for mapping of channel deposits and gas detection at the CO2SINK site, Ketzin, Germany. *Geophysical Prospecting*. 2008. Vol. 57. No. 1. pp. 111–123. DOI: 10.1111/j.1365-2478.2008.00723.x.
11. Kourki M., Riahi M.A. Seismic facies analysis from pre-stack data using self-organizing maps. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2014. Vol. 11. No. 6. Art. No. 065005. DOI: 10.1088/1742-2132/11/6/065005.
12. Malikov R., Babayev G. Applying spectral decomposition to seismic facies clustering with unsupervised machine learning. *Geofizicheskiy Zhurnal*. 2025. Vol. 47. Issue 3. DOI: 10.24028/gj.v47i3.320290.

13. Nanda N.C. Seismic data interpretation and evaluation for hydrocarbon exploration and production. In: *Advances in oil and gas exploration and production*. Switzerland. Springer Cham. 2021. 304 p. DOI: 10.1007/978-3-030-75301-6.
14. Owusu P., Raef A., Sharaf E. Carbonate seismic facies analysis in reservoir characterization: a machine learning approach with integration of reservoir mineralogy and porosity. *Geosciences*. 2025. – Vol. 15. No. 7. Art. No. 257. DOI: 10.3390/geosciences15070257.
15. Partyka G., Gridley J., Lopez J. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization. *The Leading Edge*. 1999. Vol. 18. No. 3. pp. 353–360. DOI: 10.1190/1.1438295.
16. Posamentier H.W., Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in Deep-Water settings. *Journal of Sedimentary Research*. 2003. Vol. 73. No. 3. pp. 367–388. DOI: 10.1306/111302730367.
17. Roden R., Smith T., Sacrey D. Geologic pattern recognition from seismic attributes: Principal component analysis and self-organizing maps. *Interpretation*. 2015. Vol. 3. No. 4. SAE59–SAE83. DOI: 10.1190/int-2015-0037.1.
18. Rudin C. Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. *Nature Machine Intelligence*. 2019. Vol. 1. No. 5. pp. 206–215. DOI: 10.1038/s42256-019-0048-x.
19. Samakinde C.A., Van Bever Donker J.M., Durrheim R., Manzi M. Application of seismic stratigraphy in reservoir characterisation: a case study of the passive margin deposits of the northern Orange Basin, South Africa. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2020. Vol. 11. No. 1. pp. 45–61. DOI: 10.1007/s13202-020-01050-9.
20. Samuel S.A., Knapp C.C., Knapp J.H. Seismic facies classification of salt structures and sediments in the Northern gulf of Mexico using self-organizing maps. *Geosciences*. 2025. Vol. 15. No. 5. Art. No. 183. DOI: 10.3390/geosciences15050183.
21. Sinha S., Routh P.S., Anno P.D., Castagna J.P. Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform. *Geophysics*. 2005. Vol. 70. No. 6. pp. 19–25. DOI: 10.1190/1.2127113.
22. Smith-Rouch L.S. Oligocene–Miocene Maykop/Diatom Total Petroleum System of the South Caspian Basin Province, Azerbaijan, Iran, and Turkmenistan. *Bulletin*. 2006. No. 2201. Chapter I. 27 p. DOI: 10.3133/b2201i.
23. Sukmono S., Machado V., Adelina R., Ambarsari D. Integration of 3D seismic attributes for preliminary shallow geohazard identification in deep water exploration area with no well data. *First Break*. 2017. Vol. 35. No. 8. DOI: 10.3997/1365-2397.35.8.89810.
24. Von Hartmann H., Buness H., Krawczyk C.M., Schulz R. 3-D seismic analysis of a carbonate platform in the Molasse Basin – reef distribution and internal separation with seismic attributes. *Tectonophysics*. 2012. Vol. 572–573. pp. 16–25. DOI: 10.1016/j.tecto.2012.06.033.
25. Wang Y. Frequencies of the Ricker wavelet. *Geophysics*. 2015. Vol. 80. No. 2. pp. A31–A37. DOI: 10.1190/geo2014-0441.1.
26. Yetirmishli G. J., Kazimova S. E., Samedzade A. V. Integrated application of geophysical methods in the South Caspian basin (based on the Bulla-Deniz oil and gas field). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 2. pp. 142–154. DOI: 10.46698/VNC.2025.35.96.001.
27. Yilmaz O. Seismic data analysis. In: *Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*. Tulsa, OK, USA. Society of Exploration Geophysicists. 2001. 1028 p. DOI: 10.1190/1.9781560801580.
28. Zhao T., Jayaram V., Roy A., Marfurt K.J. A comparison of classification techniques for seismic facies recognition. *Interpretation*. 2015. Vol. 3. No. 4. pp. SAE29–SAE58. DOI: 10.1190/int-2015-0044.1.
29. Zhu Z., Chen X., Ren H., Tao L., Jiang J., Wang T., Cheng M., Ding S., Du R. Seismic facies analysis using the multiattribute SOM-K-Means clustering. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2022. pp. 1–11. DOI: 10.1155/2022/1688233.

УДК 550.832:004.8

DOI: 10.46698/VNC.2026.49.25.001

Оригинальная статья

Интеллектуальная обработка данных геофизического каротажа для оценки трещиноватости карбонатных коллекторов

И.А. Панфилов¹, В.Т. Водяников², А.С. Прудкий²,
А.Н. Лосев², М.А. Модина³

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5,
e-mail: crook_80@mail.ru;

² Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева,
Россия, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49,
e-mail: vtvodyannikov@rgau-msha.ru, prudkiy@rgau-msha.ru, a.losev32@gmail.com;

³ Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова,
Россия, 353918, г. Новороссийск, пр. Ленина,
9, e-mail: marishamodina@yandex.ru

Статья поступила: 20.02.2026, доработана: 15.06.2026, принята к публикации: 19.06.2026

Резюме: Актуальность работы. Оценка трещиноватости карбонатных коллекторов является одной из наиболее сложных задач нефтегазовой геофизики, поскольку наличие трещин существенно влияет на фильтрационно-емкостные свойства пород. Традиционные методы интерпретации геофизического каротажа не всегда обеспечивают необходимую достоверность выделения трещиноватых интервалов в условиях сложного геологического строения. **Цель исследования.** Разработка и оценка эффективности интеллектуальных методов обработки данных геофизического каротажа для прогнозирования трещиноватости карбонатных коллекторов. **Методы исследования.** Использованы данные акустического, нейтронного, плотностного и электрического каротажа, FMI-сканирования и керновых исследований. Для анализа применялись методы машинного обучения Random Forest, XGBoost, SVM и сверточные нейронные сети. Выполнены предварительная обработка данных, формирование признакового пространства и обучение моделей на размеченных выборках. **Результаты.** Установлено, что наибольшую эффективность при прогнозировании трещиноватости обеспечивают ансамблевые алгоритмы и комплексная обработка данных ГИС и FMI. Максимальная точность классификации достигла 92 % при использовании XGBoost. Выявлены устойчивые связи между локальной изменчивостью каротажных параметров и развитием трещинных систем. Полученные результаты подтверждают перспективность применения интеллектуальных технологий для повышения достоверности интерпретации карбонатных коллекторов.

Ключевые слова: карбонатные коллекторы, трещиноватость, геофизический каротаж, машинное обучение, интеллектуальная обработка данных, FMI, нейронные сети, интерпретация ГИС, XGBoost, Random Forest, цифровая геофизика, петрофизика.

Для цитирования: Панфилов И.А., Водяников В.Т., Прудкий А.С., Лосев А.Н., Модина М.А. Интеллектуальная обработка данных геофизического каротажа для оценки трещиноватости карбонатных коллекторов. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 85–96. DOI: 10.46698/VNC.2026.49.25.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.49.25.001

Original paper

Intelligent processing of geophysical logging data for assessing fractures in carbonate reservoirs

I.A. Panfilov¹, V.T. Vodyannikov², A.S. Prudkiy²,
A.N. Losev², M.A. Modina³

¹ Bauman Moscow State Technical University, 5, 2nd Baumanskaya Str., Moscow 105005, Russian Federation, e-mail: crook_80@mail.ru;

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation,

e-mail: vtodyannikov@rgau-msha.ru, prudkiy@rgau-msha.ru, a.losev32@gmail.com;

³ Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk 353918, Russian Federation, e-mail: marishamodina@yandex.ru

Received: 20.02.2026, revised: 15.06.2026, accepted: 19.06.2026

Abstract: Relevance. Fracture characterization of carbonate reservoirs remains one of the most challenging problems in petroleum geophysics because fracture systems significantly affect reservoir storage and flow properties. Conventional well-log interpretation techniques often provide insufficient reliability in identifying fractured intervals under complex geological conditions. **Aim.** To develop and evaluate intelligent data-processing approaches for predicting fracture distribution in carbonate reservoirs using well logging information. **Methods.** Acoustic, neutron, density, and electrical logging data, FMI images, and core analysis results were used. Machine learning methods including Random Forest, XGBoost, Support Vector Machine, and convolutional neural networks were applied. Data preprocessing, feature engineering, and model training were performed using labeled datasets. **Results.** Ensemble algorithms and integrated interpretation of well logging and FMI data demonstrated the highest prediction performance. The XGBoost model achieved a maximum classification accuracy of 92 %. Stable relationships between local variations of logging parameters and fracture development were identified. The obtained results confirm the effectiveness of intelligent data-processing methods for improving fracture detection reliability and enhancing geological characterization of carbonate reservoirs.

Keywords: carbonate reservoirs, fracturing, well logging, machine learning, intelligent data processing, FMI, neural networks, geophysical interpretation, XGBoost, Random Forest, digital geophysics, petrophysics.

For citation: Panfilov I.A., Vodyannikov V.T., Prudkiy A.S., Losev A.N., Modina M.A. Intelligent processing of geophysical logging data for assessing fractures in carbonate reservoirs. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 85–96. DOI: 10.46698/VNC.2026.49.25.001

Введение

В настоящее время проблема изучения трещиноватости карбонатных коллекторов остается одной из наиболее сложных задач нефтегазовой геофизики. Это связано, прежде всего, с тем, что именно система трещин во многих случаях определяет фильтрационно-емкостные свойства пород, особенно в низкопористых и плотных карбонатных толщах [Motaei et al., 2026]. Для ряда месторождений наличие развитой трещиноватости фактически становится главным фактором, обеспечивающим промышленный приток углеводородов [Gao et al., 2026]. Вместе с тем сама природа карбонатных резервуаров отличается высокой неоднородностью, сложным литологическим строением и значительной изменчивостью петрофизических характери-

стик, как по разрезу, так и по площади залежи [Maciel et al., 2026]. Вследствие этого традиционные методы интерпретации геофизического каротажа далеко не всегда позволяют надежно выделять интервалы повышенной трещиноватости, особенно при отсутствии достаточного объема кернового материала [Elbalawy et al., 2026a].

Следует отметить, что в последние годы интерес к задачам интеллектуальной обработки геолого-геофизических данных значительно возрос [Chinelatto et al., 2026]. Это связано не только с развитием вычислительных методов, но и с накоплением большого объема цифровой информации, получаемой в процессе геофизических исследований скважин [Almeida et al., 2026]. Современные комплексы ГИС включают десятки различных методов каротажа, каждый из которых характеризует отдельные свойства среды и по отдельности зачастую не позволяет однозначно судить о наличии трещин [Rahimi, Riahi, 2026]. Однако при комплексном анализе данных появляется возможность выявления скрытых закономерностей между параметрами каротажных кривых и фактической трещиноватостью пород [Castellanos Bassoult et al., 2026].

Наиболее информативными при решении подобных задач считаются акустический, плотностной, нейтронный и микросканирующий методы каротажа [Deng et al., 2026]. Тем не менее даже использование расширенного комплекса методов не исключает субъективности интерпретации, поскольку оценка трещиноватости во многом зависит от опыта специалиста и применяемых критериев выделения [Hussein et al., 2026]. В сложнопостроенных карбонатных коллекторах ситуация дополнительно осложняется наличием кавернозности, вторичных преобразований и неоднородного насыщения, что приводит к перекрытию диагностических признаков на каротажных диаграммах [Diffaa et al., 2026].

В связи с этим достаточно перспективным направлением является применение методов машинного обучения и интеллектуального анализа данных при обработке результатов геофизического каротажа [Elbalawy et al., 2026b]. Подобные подходы позволяют автоматически анализировать большие массивы информации, учитывать многомерные зависимости между параметрами и снижать влияние человеческого фактора на итоговую интерпретацию [Nabipour et al., 2026]. В последние годы для решения геофизических задач активно применяются методы кластеризации, нейронные сети, алгоритмы случайного леса, градиентного бустинга и другие методы искусственного интеллекта [Tahvildari et al., 2026]. Полученные результаты показывают достаточно высокую эффективность интеллектуальных алгоритмов при прогнозировании литологии, коллекторских свойств и нефтегазонасыщенности пород [Wang et al., 2026]. Однако вопросы оценки трещиноватости карбонатных коллекторов по данным ГИС до настоящего времени остаются недостаточно изученными [Li et al., 2026].

Следует также учитывать, что формирование трещин в карбонатных толщах связано с целым рядом геологических факторов: тектоническими воздействиями, процессами растворения, диагенетическими преобразованиями и вторичной минерализацией [Aljurf et al., 2026]. Вследствие этого трещиноватость имеет сложный пространственный характер распределения, а диагностические признаки ее проявления в каротажных данных часто оказываются косвенными [Goncalves et al., 2026]. По данным ряда исследователей, наиболее надежные результаты достигаются именно при комплексном анализе нескольких независимых методов исследования с последующим использованием интеллектуальных алгоритмов обработки [Zhang et al., 2026].

Несмотря на значительное количество публикаций, посвященных цифровой интерпретации геофизических материалов, в литературе все еще ограничено число работ, связанных с применением интеллектуальных методов *specifically* для оценки трещиноватости карбонатных коллекторов [Temizel et al., 2026]. В большинстве случаев исследования носят либо локальный характер, либо ориентированы на от-

дельные типы каротажа [Santana, Leite, 2026]. В связи с этим разработка методов комплексной интеллектуальной обработки данных ГИС для выделения зон трещиноватости является актуальной научной и практической задачей современной нефтегазовой геофизики.

Методы и материалы

В качестве исходных материалов исследования использовались данные геофизического каротажа, полученные по ряду разведочных и эксплуатационных скважин, вскрывших карбонатные коллекторы различной степени трещиноватости. Для обработки привлекались материалы гамма-каротажа, нейтронного каротажа, акустического каротажа, плотностного каротажа, кавернометрии, а также данные электрических методов исследования скважин. В ряде интервалов дополнительно использовались результаты FMI-сканирования стенок скважины и материалы керновых исследований. Основным интерес представляли интервалы, характеризующиеся наличием естественной трещиноватости, кавернозности и вторичных преобразований карбонатных пород.

Предварительная подготовка данных включала проверку качества каротажных кривых, устранение выбросов, коррекцию глубинной привязки и нормализацию параметров. Для обработки и синхронизации данных использовались программные комплексы Techlog, Petrel, Python 3.11 и MATLAB R2023a. Часть расчетов выполнялась средствами библиотеки Scikit-learn, а для построения нейросетевых моделей использовался пакет TensorFlow. Следует отметить, что применение открытых библиотек позволяло выполнять обработку без использования дорогостоящих специализированных модулей, что является важным при проведении университетских исследований.

Для формирования обучающей выборки использовались интервалы с подтвержденной трещиноватостью по данным керна и FMI. Размер итоговой выборки составил более 18000 точек измерений с дискретностью по глубине 0,1 м. В качестве входных параметров рассматривались значения естественной радиоактивности, интервального времени пробега акустической волны, плотности породы, водородосодержания, электрического сопротивления, коэффициента кавернозности, а также производные характеристики, вычисленные по скользящему окну размером 0,5–2 м. Кроме того рассчитывались локальные градиенты каротажных кривых, коэффициенты вариации и корреляционные зависимости между соседними методами каротажа.

Обработка выполнялась на вычислительных станциях кафедры, оснащенных процессорами Intel Xeon Silver и графическими ускорителями NVIDIA RTX 3080 и RTX A4000. Для хранения и обработки данных использовались рабочие станции под управлением Ubuntu 22.04 и Windows 11. При выполнении вычислений объем оперативной памяти составлял от 64 до 128 Гб, что позволяло производить обработку больших массивов каротажной информации без предварительного разбиения на отдельные интервалы.

При проведении исследований использовались методы кластеризации, алгоритмы случайного леса, градиентного бустинга и многослойные нейронные сети. На предварительном этапе выполнялась оценка информативности параметров с использованием коэффициентов взаимной информации и корреляционного анализа. После этого производилось обучение моделей на размеченной части данных. Разделение выборки осуществлялось в соотношении 70 % для обучения, 15 % для валидации и 15 % для тестирования модели. Обучение нейронной сети выполнялось в течение 150–250 эпох при размере пакета 64–128 наблюдений. В качестве функции потерь использовалась бинарная кросс-энтропия, а оптимизация параметров модели осуществлялась алгоритмом Adam с начальной скоростью обучения 0,001.

Для анализа текстурных особенностей FMI-изображений дополнительно применялись методы цифровой обработки изображений. Обработка выполнялась с использованием библиотеки OpenCV. Изображения приводились к единому разрешению 512×512 пикселей, после чего рассчитывались статистические признаки текстуры, энтропия, локальная неоднородность и параметры градиентной структуры. В ряде случаев применялись сверточные нейронные сети типа CNN, содержащие от трех до пяти сверточных слоев. Следует отметить, что использование сверточных сетей позволяло достаточно устойчиво выделять зоны развития трещиноватости даже при наличии шумов и локальных дефектов записи.

Контроль достоверности результатов производился путем сопоставления прогноза модели с фактическими данными кернового описания, результатами гидродинамических исследований и материалами испытаний скважин. Оценка качества моделей выполнялась по значениям Accuracy, Precision, Recall и F1-score. Наилучшие результаты были получены при использовании ансамблевых алгоритмов и гибридных схем обработки, совмещающих петрофизические критерии и методы машинного обучения. Следует отметить, что применение комплексной интеллектуальной обработки позволило уменьшить влияние субъективной интерпретации и повысить устойчивость прогноза трещиноватости в сложнопостроенных карбонатных коллекторах.

Результаты

Проведенные исследования показали, что применение методов интеллектуальной обработки данных геофизического каротажа действительно позволяет существенно повысить достоверность оценки трещиноватости карбонатных коллекторов по сравнению с традиционной визуальной интерпретацией. Уже на предварительном этапе анализа было установлено, что отдельные методы каротажа по-разному реагируют на развитие трещинной системы, причем характер отклика зависит не только от самой трещиноватости, но и от литологического состава пород, степени вторичных преобразований и насыщения коллектора. Наиболее устойчивые изменения наблюдались по данным акустического и плотностного каротажа. В интервалах с развитой трещиноватостью фиксировалось увеличение интервального времени пробега продольной волны на 8–17 %, а также локальное снижение объемной плотности пород в среднем на $0,04\text{--}0,12 \text{ г/см}^3$. Однако необходимо отметить, что подобные изменения наблюдались не во всех случаях, особенно при наличии плотных перекристаллизованных известняков и доломитов, где влияние трещин частично маскировалось вторичными процессами минерализации.

При анализе исходных каротажных материалов было выявлено, что наибольшие трудности интерпретации возникают в интервалах, содержащих одновременно трещинную и кавернозную пористость. В таких условиях диагностические признаки начинают перекрываться. Например, увеличение нейтронной пористости и снижение плотности могли наблюдаться как в трещиноватых интервалах, так и в зонах развития вторичных каверн. Визуальная интерпретация подобных интервалов приводила к значительному количеству ошибок, особенно при отсутствии FMI-сканирования или достаточного объема керна. При использовании интеллектуальных алгоритмов данная проблема частично устранялась за счет комплексного учета нескольких параметров одновременно. В частности, алгоритмы выявляли устойчивые сочетания локальных изменений акустических, электрических и плотностных характеристик, которые при ручной интерпретации зачастую не воспринимались как единая закономерность.

Предварительный корреляционный анализ показал, что наибольшей информативностью обладают производные параметры, вычисленные на основе нескольких методов ГИС. Так, коэффициенты локальной изменчивости акустического сигнала и плотности продемонстрировали более высокую связь с фактической трещинова-

тостью, чем абсолютные значения каротажных параметров. Особенно хорошо данная зависимость проявлялась в интервалах тектонически нарушенных карбонатных толщ. В подобных зонах фиксировались резкие локальные изменения сопротивления, интервального времени пробега и кавернозности, причем пространственное распределение этих аномалий имело достаточно устойчивый характер.

Использование методов кластеризации позволило разделить исследуемые интервалы на несколько устойчивых групп. Первая группа соответствовала плотным непроницаемым карбонатам без признаков развития трещиноватости. Для этих интервалов были характерны низкие значения пористости, стабильные акустические параметры и высокая плотность пород. Вторая группа включала зоны с преимущественно поровым типом коллектора, где наблюдались относительно равномерные изменения нейтронного и плотностного каротажа. Третья группа характеризовалась наличием выраженной трещиноватости и отличалась значительной неоднородностью каротажных кривых, повышенной дисперсией акустических параметров и локальными скачками сопротивления. Следует отметить, что именно эта группа наиболее уверенно сопоставлялась с фактическими интервалами трещиноватости по данным керна и FMI.

Достаточно интересные результаты были получены при использовании алгоритма случайного леса. После обучения модели на размеченной выборке точность распознавания трещиноватых интервалов составила около 84 %. При этом наиболее значимыми параметрами оказались интервальное время пробега акустической волны, коэффициент кавернозности, локальный градиент сопротивления и вариация плотности. Следует отметить, что важность отдельных параметров менялась в зависимости от литологического типа пород. Для известняков наибольший вклад в прогноз вносили акустические характеристики, тогда как для доломитов значительно возрастала роль электрических методов каротажа.

Использование градиентного бустинга позволило дополнительно повысить устойчивость прогноза. Значение F1-score при этом увеличилось до 0,87, а количество ложноположительных интервалов снизилось почти на 14 % (рис. 1).

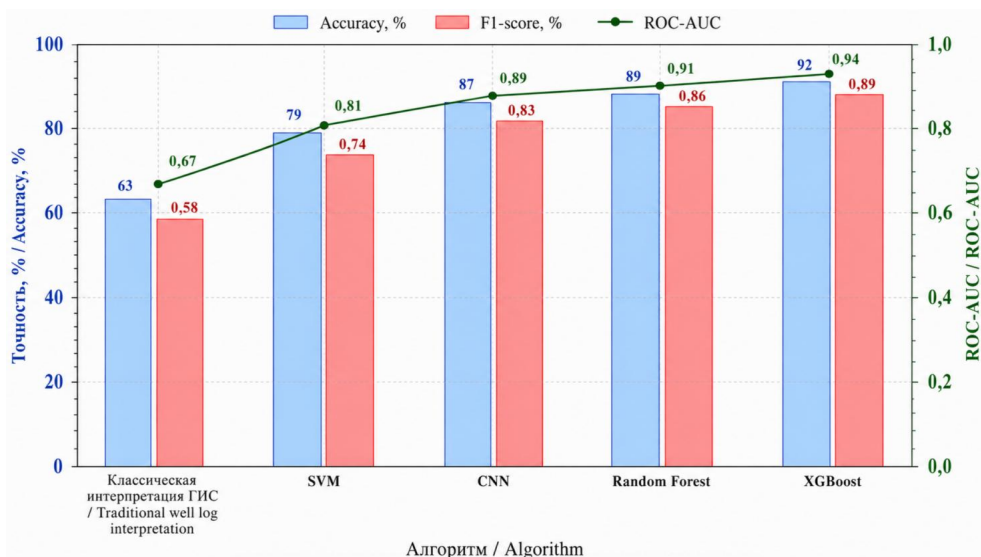


Рис. 1. Сравнение точности различных алгоритмов интеллектуальной обработки данных ГИС при прогнозировании трещиноватости карбонатных коллекторов /

Fig. 1. Comparison of the accuracy of various algorithms for intelligent processing of well logging data in predicting fracturing of carbonate reservoirs

Особенно заметным преимущество модели оказалось в сложнопостроенных интервалах с неоднородным насыщением и переменной минерализацией пластовых вод. Вероятно, это связано с тем, что ансамблевые алгоритмы лучше учитывают не-

линейные зависимости между параметрами каротажа и способны адаптироваться к различным типам геологического строения.

Отдельно следует отметить результаты обработки FMI-изображений с использованием сверточных нейронных сетей. После предварительной подготовки изображений и обучения модели удалось добиться достаточно устойчивого распознавания линейных и субвертикальных трещин даже в условиях частичного зашумления записи. Точность выделения трещиноватых интервалов по FMI составила около 89 %, что оказалось выше, чем при использовании только традиционного визуального анализа изображений. Особенно хорошо модель определяла системы мелких субпараллельных трещин, которые при ручной интерпретации нередко воспринимались как шум или дефекты записи.

Интересно отметить, что при совместном использовании каротажных данных и FMI-изображений качество прогноза возрастало еще сильнее. Комплексная модель показала итоговую точность порядка 91–93 % в зависимости от конкретного объекта исследования. Это свидетельствует о том, что методы интеллектуальной обработки наиболее эффективно работают именно при комплексировании различных источников геолого-геофизической информации. По отдельности даже наиболее информативные методы не обеспечивают достаточной надежности прогноза.

При анализе пространственного распределения выделенных зон трещиноватости было установлено, что наиболее интенсивное развитие трещин наблюдается в интервалах, приуроченных к тектоническим нарушениям и зонам повышенной деформации пород. В этих участках фиксировались не только локальные изменения каротажных параметров, но и существенное увеличение неоднородности сигнала. Особенно хорошо подобные зоны выделялись на основе статистических характеристик скользящего окна. Вероятно, именно локальная изменчивость параметров является одним из наиболее устойчивых признаков развития трещинных систем в карбонатных коллекторах.

Следует также отметить, что применение интеллектуальных алгоритмов позволило выявить ряд интервалов скрытой трещиноватости, которые первоначально не были выделены при стандартной интерпретации (рис. 2).

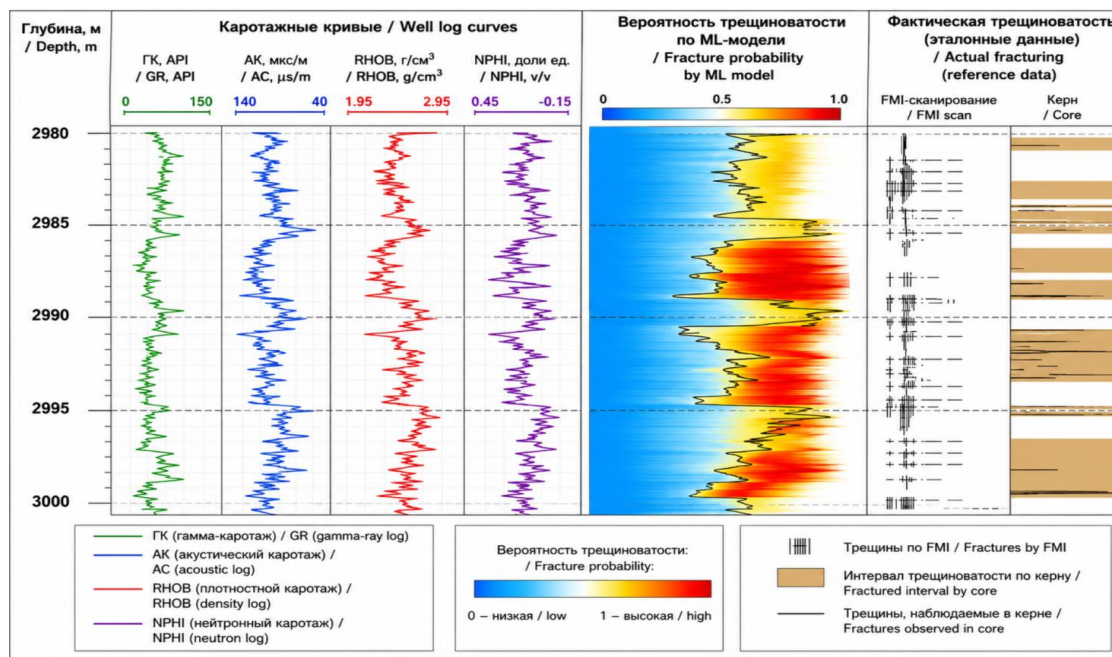


Рис. 2. Сопоставление прогнозируемой трещиноватости по результатам интеллектуальной обработки данных ГИС с фактическими интервалами трещиноватости по данным FMI и керна /

Fig. 2. Comparison of predicted fracturing based on the results of intelligent processing of well logging data with actual fracturing intervals based on FMI and core data

Последующее сопоставление с материалами испытаний скважин показало, что многие из этих интервалов действительно характеризовались повышенной продуктивностью. Это особенно важно для низкопористых карбонатных коллекторов, где наличие даже относительно небольшой системы открытых трещин способно существенно влиять на фильтрационные свойства пласта.

Вместе с тем проведенные исследования показали и ряд ограничений используемых подходов. Наибольшее количество ошибок наблюдалось в интервалах с интенсивной вторичной минерализацией трещин. В подобных случаях каротажные параметры могли соответствовать плотным слаботрещиноватым породам, несмотря на наличие развитой трещинной структуры. Аналогичная проблема возникала в зонах с высоким содержанием глинистого материала, где электрические и нейтронные методы начинали реагировать преимущественно на литологические особенности, а не на систему трещин. В результате часть интервалов ошибочно классифицировалась как трещиноватые.

Кроме того, существенное влияние на качество прогноза оказывает объем и качество обучающей выборки. При недостаточном количестве размеченных интервалов устойчивость модели заметно снижалась. Особенно это проявлялось при переходе к новым объектам с иным литологическим строением и отличающимися условиями формирования коллектора. Вероятно, для дальнейшего повышения точности прогноза требуется формирование более крупных региональных баз данных, включающих различные типы карбонатных резервуаров.

Несмотря на отмеченные ограничения, результаты исследования в целом подтверждают высокую перспективность применения интеллектуальной обработки данных ГИС для оценки трещиноватости карбонатных коллекторов. Использование методов машинного обучения позволяет значительно сократить субъективность интерпретации, повысить устойчивость прогноза и обеспечить более детальное выделение перспективных интервалов. Особенно важным представляется возможность автоматизированной обработки больших объемов каротажной информации, что становится актуальным при разработке крупных нефтегазовых месторождений и анализе многоскважинных данных.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что комплексное использование данных геофизического каротажа, FMI-изображений и методов интеллектуального анализа позволяет эффективно решать задачу оценки трещиноватости карбонатных коллекторов даже в условиях сложного геологического строения. Полученные результаты могут использоваться при построении геологических моделей, выборе интервалов перфорации, прогнозе продуктивности скважин и уточнении фильтрационно-емкостных характеристик карбонатных резервуаров.

Выводы

Проведенные исследования показали, что применение методов интеллектуальной обработки данных геофизического каротажа позволяет существенно повысить достоверность оценки трещиноватости карбонатных коллекторов по сравнению с традиционными подходами интерпретации. Установлено, что наибольшей информативностью при прогнозировании трещиноватости обладают комплексные сочетания акустического, плотностного, нейтронного и электрического каротажа, а также производные статистические параметры, характеризующие локальную неоднородность геофизических сигналов.

В ходе работы было установлено, что использование алгоритмов машинного обучения обеспечивает устойчивое выявление трещиноватых интервалов даже в условиях сложного литологического строения карбонатных толщ и наличия вторичных процессов минерализации. Наиболее высокие результаты были получены при

использовании ансамблевых методов обработки данных. Алгоритм XGBoost продемонстрировал максимальную эффективность при решении задачи классификации трещиноватых интервалов, обеспечив точность прогноза на уровне 92 % и значение ROC-AUC около 0,94. Несколько меньшую, но также высокую эффективность показали Random Forest и сверточные нейронные сети.

Установлено, что совместное использование стандартных данных ГИС и FMI-изображений значительно повышает качество прогноза по сравнению с применением отдельных методов каротажа. Использование сверточных нейронных сетей позволило достаточно надежно выделять системы субвертикальных и мелкодисперсных трещин даже при наличии шумов и локальных дефектов записи. При этом применение комплексной модели обеспечило хорошее согласование результатов интеллектуальной интерпретации с фактическими данными кернового описания и результатами испытаний скважин.

В процессе исследований было выявлено, что одним из наиболее устойчивых признаков развития трещиноватости является увеличение локальной изменчивости параметров каротажных кривых. Особенно хорошо данная закономерность проявляется в интервалах тектонически нарушенных карбонатных пород. Использование методов интеллектуального анализа позволило дополнительно выделить ряд скрытых трещиноватых интервалов, которые не были выявлены при стандартной визуальной интерпретации, но подтвердились по данным испытаний и FMI-сканирования.

Следует отметить, что качество прогноза существенно зависит от полноты и репрезентативности обучающей выборки. Наибольшие сложности интерпретации наблюдались в интервалах с интенсивной вторичной минерализацией трещин и повышенным содержанием глинистого материала. Несмотря на это, результаты работы подтверждают высокую перспективность применения интеллектуальных методов обработки данных ГИС для задач оценки фильтрационно-емкостных свойств карбонатных коллекторов.

Полученные результаты могут быть использованы при построении геолого-гидродинамических моделей месторождений, уточнении интервалов перфорации, прогнозировании продуктивности скважин и оптимизации разработки сложнопостроенных карбонатных резервуаров. Дальнейшее развитие данного направления связано с расширением обучающих выборок, использованием многоскважинных данных и внедрением гибридных интеллектуальных систем интерпретации геофизической информации.

Литература

1. Aljurf S., Abu-Mahfouz I.S., Chan S. Methodological workflow for assessing heterogeneity in immature organic-rich carbonate reservoirs // *MethodsX*. – 2026. – Vol. 16. – Art. No. 103875. DOI: 10.1016/j.mex.2026.103875.
2. Almeida G.M.S., Barbosa C.H.S., Santo M.C.O.L., Landau L. A Comparison of supervised machine learning algorithms to predict porosity in carbonate reservoirs from well logs: a case study of quissama formation carbonate in the Campos Basin, Brazil // *Journal of Petroleum Geology*. – 2026. – Vol. 49. No. 2. – pp. 448–465. DOI: 10.1111/jpg.70036.
3. Castellanos Bassoult L.A., Perez Hernandez L.A., Alcantara R., Velasquez A. Data-Driven Sw prediction and porosity typing from synthetic Vp/Vs: a feasibility approach for enhancing hydrocarbon recovery in NFRs // *IPTC Summit on AI for the Energy Industry (IPTC 2026)*. Dubai, UAE, 2026. DOI: 10.2523/IPTC-25211-MS.
4. Chinelatto G.F., Souza J.P.D.P., Basso M., Vidal A.C. The use of convolutional neural networks to predict carbonate dissolution features in acoustic borehole images: an example from brazilian pre-salt reservoirs // *Earth Science Informatics*. – 2026. – Vol. 19. No. 4. – Art. No. 45. DOI: 10.1007/s12145-026-02097-8.
5. Deng P., Tang J., Chen Y., Yu D. Precise Characterization of fluid logging responses

in complex shale reservoirs: a case study from the Hongxing Area, Eastern Sichuan Basin // *Geofluids*. – 2026. – Vol. 2026. No. 1. – Art. No. 1419048. DOI: 10.1155/gf/1419048.

6. Diffaa A., Al-Khalidy A.A., Aji A. Hybrid Traditional interpretation and machine learning-based log reconstruction for enhanced petrophysical evaluation of Hartha formation, of XS oil field, Central Iraq // *Iraqi Geological Journal*. – 2026. – Vol. 59. No. 1. – pp. 186–203. DOI: 10.46717/igi.2026.59.1C.14.

7. Elbalawy M.A., Takacs E., Velledits F. From subsurface data to heat economics: A novel machine-learning seismic workflow for geothermal reservoir delineation, subsurface derisking, and 3D modelling of deep triassic carbonates // *Results in Engineering*. – 2026a. – Vol. 30. – Art. No. 110343. DOI: 10.1016/j.rineng.2026.110343.

8. Elbalawy M.A., Eid M.H., Badawi M., Takacs E., Velledits F. From lithology prediction to geothermal energy production: Leveraging data-driven and financial insights to unlock geothermal potential of a carbonate reservoir, SE Hungary // *Renewable Energy*. – 2026b. – Vol. 259. – Art. No. 125031. DOI: 10.1016/j.renene.2025.125031.

9. Gao Y., Wu Q., Zhao W., Zhao L., Li J. Quantitative classification of microscopic pore structure in carbonate reservoirs using multi-source data fusion and machine learning integration // *Processes*. – 2026. – Vol. 14. No. 9. – Art. No. 1432. DOI: 10.3390/pr14091432.

10. Goncalves J.F.V., de Figueiredo J.J.S., Da Silva J.R.B.S. et al. Vector-based and machine learning approaches for pore network parameters analysis // *Geophysical Prospecting*. – 2026. – Vol. 74. No. 1. – Art. No. e70117. DOI: 10.1111/1365-2478.70117.

11. Hussein H.A.A., Hadi F.A., Jweeg M.J., Issa M.A., Mohammed M.M., Jasim D.J. An intensive study to determine the in situ minimum horizontal stress using well logging data // *Indian Geotechnical Journal*. – 2026. – Vol. 56. No. 3. – pp. 1292–1306. DOI: 10.1007/s40098-025-01221-7.

12. Li J., Liu H., Yan L. et al. Numerical Well Testing of Ultra-Deep Fault-controlled carbonate reservoirs: a geological model-based approach with machine learning assisted inversion // *Processes*. – 2026. – Vol. 14. No. 2. – Art. No. 187. DOI: 10.3390/pr14020187.

13. Maciel R.S., Carneiro J.N.E., Souza A.F.F., Monteiro D., Gunnerud V. A method for inorganic scaling simulation: multiphase flow and multi-ionic brine with a mass transfer approach // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2026. – Vol. 48. No. 5. – Art. No. 355. DOI: 10.1007/s40430-025-06290-6.

14. Motaei E., Yunos K.A.B., Othman T.R.T., Ghadami N. AI-Guided ensemble modeling for optimized well test analysis to unlock exploration targets and narrow down uncertainty in volumetric assessment // *Journal of Petroleum Geology*. – 2026. DOI: 10.1111/jpg.70055.

15. Nabipour I., Raoof A., Qajar J. Resolution-aware multiscale 3D CNNs for permeability estimation in carbonate rocks: an architecture-agnostic transfer-learning framework // *Advances in Water Resources*. – 2026. – Vol. 213. – Art. No. 105311. DOI: 10.1016/j.advwatres.2026.105311.

16. Rahimi M., Riahi M.A. Integration of the RNN and geostatistics methods for permeability prediction: a case study from the surmeh formation, Persian Gulf // *Discover Applied Sciences*. – 2026. – Vol. 8. No. 4. – Art. No. 394. DOI: 10.1007/s42452-026-08350-5.

17. Santana H.M., Leite E.P. 3D facies modeling of a carbonate reservoir in the Santos Basin using machine learning // *Journal of Applied Geophysics*. – 2026. – Vol. 245. – Art. No. 106049. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2025.106049.

18. Tahvildari S.P., Shojaei S., Masihi M. A physics-informed hybrid ML framework for pore pressure and fracture gradient prediction in carbonate reservoirs // *Scientific Reports*. – 2026. – Vol. 16. No. 1. – Art. No. 8925. DOI: 10.1038/s41598-026-41773-z.

19. Temizel C., Tutun S., Canbaz C.H. et al. AI applications in reservoir characterization, geology, and geophysics. in: artificial intelligence in the energy industry: theory, case studies, and applications. CRC Press, 2026. – pp. 81–159. DOI: 10.1201/9781003617327-2.

20. Wang L., Wang H., Wei S. et al. A Novel Quick-Win dual-branch neural operator proxy for real-time waterflood simulation in heterogeneous porous carbonate reservoirs // *IPTC Summit on AI for the Energy Industry (IPTC 2026)*. 2026. DOI: 10.2523/IPTC-25133-MS.

21. Zhang T., Yan K., Feng Z., Liu Y., Xie K., Wang F., Meng L. A 3D Permeability prediction model for multicomponent carbonate rocks: multisoft-threshold transformer-UNet // *SPE Journal*. – 2026. – Vol. 31. No. 4. – pp. 2489–2499. DOI: 10.2118/231860-PA.

References

1. Aljurf S., Abu-Mahfouz I.S., Chan S. Methodological workflow for assessing heterogeneity in immature organic-rich carbonate reservoirs. *MethodsX*. 2026. Vol. 16. Art. No. 103875. DOI: 10.1016/j.mex.2026.103875.
2. Almeida G.M.S., Barbosa C.H.S., Santo M.C.O.L., Landau L. A Comparison of supervised machine learning algorithms to predict porosity in carbonate reservoirs from well logs: a case study of quissama formation carbonate in the Campos Basin, Brazil. *Journal of Petroleum Geology*. 2026. Vol. 49. No. 2. pp. 448–465. DOI: 10.1111/jpg.70036.
3. Castellanos Bassoult L.A., Perez Hernandez L.A., Alcantara R., Velasquez A. Data-Driven Sw prediction and porosity typing from synthetic Vp/Vs: a feasibility approach for enhancing hydrocarbon recovery in NFRs. *IPTC Summit on AI for the Energy Industry (IPTC 2026)*. Dubai. UAE. 2026. DOI: 10.2523/IPTC-25211-MS.
4. Chinelatto G.F., Souza J.P.D.P., Basso M., Vidal A.C. The use of convolutional neural networks to predict carbonate dissolution features in acoustic borehole images: an example from brazilian pre-salt reservoirs. *Earth Science Informatics*. 2026. Vol. 19. No. 4. Art. No. 45. DOI: 10.1007/s12145-026-02097-8.
5. Deng P., Tang J., Chen Y., Yu D. Precise Characterization of fluid logging responses in complex shale reservoirs: a case study from the Hongxing Area, Eastern Sichuan Basin. *Geofluids*. 2026. Vol. 2026. No. 1. Art. No. 1419048. DOI: 10.1155/gf/1419048.
6. Diffaa A., Al-Khalidy A.A., Aji A. Hybrid Traditional interpretation and machine learning-based log reconstruction for enhanced petrophysical evaluation of Hartha formation, of XS oil field, Central Iraq. *Iraqi Geological Journal*. 2026. Vol. 59. No. 1. pp. 186–203. DOI: 10.46717/igj.2026.59.1C.14.
7. Elbalawy M.A., Takacs E., Velledits F. From subsurface data to heat economics: A novel machine-learning seismic workflow for geothermal reservoir delineation, subsurface derisking, and 3D modelling of deep triassic carbonates. *Results in Engineering*. 2026a. Vol. 30. Art. No. 110343. DOI: 10.1016/j.rineng.2026.110343.
8. Elbalawy M.A., Eid M.H., Badawi M., Takacs E., Velledits F. From lithology prediction to geothermal energy production: Leveraging data-driven and financial insights to unlock geothermal potential of a carbonate reservoir, SE Hungary. *Renewable Energy*. 2026b. Vol. 259. Art. No. 125031. DOI: 10.1016/j.renene.2025.125031.
9. Gao Y., Wu Q., Zhao W., Zhao L., Li J. Quantitative classification of microscopic pore structure in carbonate reservoirs using multi-source data fusion and machine learning integration. *Processes*. 2026. Vol. 14. No. 9. Art. No. 1432. DOI: 10.3390/pr14091432.
10. Goncalves J.F.V., de Figueiredo J.J.S., Da Silveira J.R.B.S. et al. Vector-based and machine learning approaches for pore network parameters analysis. *Geophysical Prospecting*. 2026. Vol. 74. No. 1. Art. No. e70117. DOI: 10.1111/1365-2478.70117.
11. Hussein H.A.A., Hadi F.A., Jweeg M.J., Issa M.A., Mohammed M.M., Jasim D.J. An intensive study to determine the in situ minimum horizontal stress using well logging data. *Indian Geotechnical Journal*. 2026. Vol. 56. No. 3. pp. 1292–1306. DOI: 10.1007/s40098-025-01221-7.
12. Li J., Liu H., Yan L. et al. Numerical Well Testing of Ultra-Deep Fault-controlled carbonate reservoirs: a geological model-based approach with machine learning assisted inversion. *Processes*. 2026. Vol. 14. No. 2. Art. No. 187. DOI: 10.3390/pr14020187.
13. Maciel R.S., Carneiro J.N.E., Souza A.F.F., Monteiro D., Gunnerud V. A method for inorganic scaling simulation: multiphase flow and multi-ionic brine with a mass transfer approach. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2026. Vol. 48. No. 5. Art. No. 355. DOI: 10.1007/s40430-025-06290-6.
14. Motaei E., Yunos K.A.B., Othman T.R.T., Ghadami N. AI-Guided ensemble modeling for optimized well test analysis to unlock exploration targets and narrow down uncertainty in volumetric assessment. *Journal of Petroleum Geology*. 2026. DOI: 10.1111/jpg.70055.
15. Nabipour I., Raoof A., Qajar J. Resolution-aware multiscale 3D CNNs for permeability estimation in carbonate rocks: an architecture-agnostic transfer-learning framework. *Advances in Water Resources*. 2026. Vol. 213. Art. No. 105311. DOI: 10.1016/j.advwatres.2026.105311.

16. Rahimi M., Riahi M.A. Integration of the RNN and geostatistics methods for permeability prediction: a case study from the surmeh formation, Persian Gulf. *Discover Applied Sciences*. 2026. Vol. 8. No. 4. Art. No. 394. DOI: 10.1007/s42452-026-08350-5.
17. Santana H.M., Leite E.P. 3D facies modeling of a carbonate reservoir in the Santos Basin using machine learning. *Journal of Applied Geophysics*. 2026. Vol. 245. Art. No. 106049. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2025.106049.
18. Tahvildari S.P., Shojaei S., Masihi M. A physics-informed hybrid ML framework for pore pressure and fracture gradient prediction in carbonate reservoirs. *Scientific Reports*. 2026. Vol. 16. No. 1. Art. No. 8925. DOI: 10.1038/s41598-026-41773-z.
19. Temizel C., Tutun S., Canbaz C.H. et al. AI applications in reservoir characterization, geology, and geophysics. in: *artificial intelligence in the energy industry: theory, case studies, and applications*. CRC Press. 2026. pp. 81–159. DOI: 10.1201/9781003617327-2.
20. Wang L., Wang H., Wei S. et al. A Novel Quick-Win dual-branch neural operator proxy for real-time waterflood simulation in heterogeneous porous carbonate reservoirs. *IPTC Summit on AI for the Energy Industry (IPTC 2026)*. 2026. DOI: 10.2523/IPTC-25133-MS.
21. Zhang T., Yan K., Feng Z., Liu Y., Xie K., Wang F., Meng L. A 3D Permeability prediction model for multicomponent carbonate rocks: multisoft-threshold transformer-UNet. *SPE Journal*. 2026. Vol. 31. No. 4. pp. 2489–2499. DOI: 10.2118/231860-PA.

УДК 550.34:551.24(470.6)

DOI: 10.46698/VNC.2026.66.96.001

Оригинальная статья

Прогноз геодинамически активных зон Предкавказья на основе анализа временных рядов микросейсмических наблюдений

А.А. Ступина¹, Д.Ю. Евсюков^{2,1}, М.Н. Степанцевич¹,
М.С. Никаноров¹, Е.М. Дорофеев³

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА
им. К.А. Тимирязева, Россия, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49,
e-mail: h677hm@gmail.com, stepancevich@rgau-msha.ru,
nikanorov@rgau-msha.ru;

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия,
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: evsjob@yandex.ru;

³ Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, Россия,
353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93,
e-mail: 79180401222@yandex.ru

Статья поступила: 31.03.2026, доработана: 12.06.2026, принята к публикации: 15.06.2026

Резюме: Актуальность работы. Территория Предкавказья характеризуется высокой тектонической активностью и сложным геодинамическим режимом, что определяет необходимость совершенствования методов выявления и прогноза геодинамически активных зон на основе современных геофизических данных. **Цель исследования.** Установление закономерностей изменения параметров микросейсмического поля и оценка возможности использования временных рядов микросейсмических наблюдений для прогноза геодинамически активных зон Предкавказья. **Методы исследования.** Использованы временные ряды непрерывных микросейсмических наблюдений в диапазоне частот 0,1–40 Гц. Выполнены предварительная обработка сигналов, спектральный и корреляционный анализ, а также пространственная интерпретация результатов с сопоставлением данных микросейсмического мониторинга и тектонического строения региона. **Результаты.** Установлено, что геодинамически активные зоны характеризуются повышенными амплитудами микросейсмических колебаний, устойчивыми спектральными максимумами в диапазоне 2–5 Гц и увеличенными коэффициентами корреляции между пунктами наблюдений. Выявлены пространственно устойчивые аномалии микросейсмической активности, совпадающие с крупными разломными структурами. Показано, что изменения параметров микросейсмического поля могут предшествовать локальным деформационным процессам и слабосейсмическим событиям, что подтверждает перспективность применения микросейсмического мониторинга для оценки современного геодинамического состояния региона.

Ключевые слова: Предкавказье, геодинамика, микросейсмичность, временные ряды, микросейсмический мониторинг, тектонические нарушения, спектральный анализ, геодинамически активные зоны, геофизические исследования, сейсмический мониторинг.

Для цитирования: Ступина А.А., Евсюков Д.Ю., Степанцевич М.Н., Никаноров М.С., Дорофеев Е.М. Прогноз геодинамически активных зон Предкавказья на основе анализа временных рядов микросейсмических наблюдений. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 97–107. DOI: 10.46698/VNC.2026.66.96.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.66.96.001

Original paper

Prediction of geodynamically active zones of the Ciscaucasia based on the analysis of time series of microseismic observations

A.A. Stupina¹, D.Yu. Evsyukov^{2,1}, M.N. Stepansevich¹,
M.S. Nikanorov¹, E.M. Dorofeev³

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
49 Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation,
e-mail: h677hm@gmail.com, stepancevich@rgau-msha.ru,
nikanorov@rgau-msha.ru;

² Bauman Moscow State Technical University, 5, 2nd Baumanskaya Str., Moscow 105005,
Russian Federation, e-mail: evsjob@yandex.ru;

³ Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk 353918,
Russian Federation, e-mail: 79180401222@yandex.ru

Received: 31.03.2026, revised: 12.06.2026, accepted: 15.06.2026

Abstract: Relevance. The Ciscaucasia is characterized by high tectonic activity and a complex geodynamic regime, which necessitates the development of advanced approaches for identifying and forecasting geodynamically active zones using modern geophysical observations. **Aim.** To determine the patterns of microseismic field variations and assess the applicability of microseismic time series analysis for forecasting geodynamically active zones in the Ciscaucasia. **Methods.** Continuous microseismic observation time series recorded in the frequency range of 0.1–40 Hz were analyzed. Signal preprocessing, spectral analysis, correlation analysis, and spatial interpretation were performed, followed by comparison of microseismic monitoring results with regional tectonic structures. **Results.** Geodynamically active areas were found to be characterized by increased amplitudes of microseismic oscillations, stable spectral peaks within the 2–5 Hz frequency range, and elevated correlation coefficients between observation sites. Spatially persistent anomalies of microseismic activity coinciding with major fault systems were identified. Variations in microseismic field parameters were shown to precede local deformation processes and weak seismic events. The obtained results demonstrate the potential of microseismic monitoring for assessing the present geodynamic state of the region and forecasting geodynamically active zones.

Keywords: Ciscaucasia, geodynamics, microseismicity, time series, microseismic monitoring, tectonic faults, spectral analysis, geodynamically active zones, geophysical studies, seismic monitoring.

For citation: Stupina A.A., Evsyukov D.Yu., Stepansevich M.N., Nikanorov M.S., Dorofeev E.M. Prediction of geodynamically active zones of the Ciscaucasia based on the analysis of time series of microseismic observations. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 97–107. DOI: 10.46698/VNC.2026.66.96.001

Введение

В последние десятилетия территория Предкавказья рассматривается как один из наиболее сложных и динамически напряженных регионов юга России. Современные геодинамические процессы здесь определяются взаимодействием круп-

ных тектонических структур Кавказского складчатого сооружения и Восточно-Европейской платформы, что приводит к формированию активных разломных зон, локальных областей деформаций и повышенной микросейсмической активности [Рассказов и др., 2018]. Для многих районов Предкавказья характерно наличие скрытых геодинамических процессов, которые далеко не всегда сопровождаются заметными сейсмическими событиями, однако оказывают существенное влияние на состояние геологической среды [Asanuma et al., 2004]. В связи с этим особый интерес в последние годы вызывают исследования, связанные с анализом микросейсмического поля и временных рядов наблюдений, позволяющих выявлять слабые изменения напряженно-деформированного состояния массива пород [Serdyukov et al., 2015].

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных вопросам региональной геодинамики Кавказа и Предкавказья [Shestopalov, Kril, 2022; Eremenko et al., 2022; Ergun et al., 2025], проблема выделения и прогноза геодинамически активных зон до настоящего времени остается окончательно не решенной. В большинстве работ основной акцент делается либо на анализе сильных сейсмических событий, либо на изучении отдельных тектонических структур [Baisch, McMahon, 2014]. Вместе с тем, как показывают результаты современных исследований, процессы подготовки активизации геологической среды сопровождаются изменением характеристик фоновой микросейсмичности, причем такие изменения могут наблюдаться задолго до проявления крупных деформационных процессов [Адушкин, Спивак, 2005]. По этой причине анализ временных рядов микросейсмических наблюдений представляет значительный интерес не только с научной точки зрения, но и в плане практического геодинамического мониторинга [Rong et al., 2025].

Следует отметить, что микросейсмические колебания обладают высокой чувствительностью к изменениям состояния геологической среды. Даже незначительные вариации напряжений в разломных зонах могут приводить к изменению спектральных и энергетических характеристик микросейсмического фона [Wu et al., 2025]. В ряде работ показано, что для геодинамически активных районов характерны устойчивые аномалии в структуре временных рядов, проявляющиеся в виде изменения амплитудных характеристик, появления квазипериодических колебаний и перестройки спектрального состава сигнала [Khmelinin et al., 2021; Bornyakov et al., 2023]. Однако единый подход к интерпретации подобных аномалий пока отсутствует, а результаты различных авторов во многом противоречат друг другу [Семинский и др., 2022].

Особую сложность представляет тот факт, что микросейсмическое поле формируется под воздействием большого числа факторов различной природы. Помимо собственно тектонических процессов, существенное влияние оказывают климатические условия, техногенные воздействия, сезонные колебания и локальные геологические особенности территории [Lin et al., 2025]. По этой причине при анализе временных рядов требуется применение методов, позволяющих выделять устойчивые компоненты сигнала и исключать случайные шумовые составляющие [Attila Csaba et al., 2015]. Наиболее перспективными в этом отношении являются методы спектрального анализа, корреляционного анализа и различные варианты временно-частотной обработки сигналов.

Для территории Предкавказья подобные исследования особенно актуальны в связи с высокой плотностью населения и наличием большого количества объектов промышленной и транспортной инфраструктуры. Развитие современных систем гео-

динамического мониторинга требует получения более детальных представлений о пространственно-временном распределении геодинамической активности региона. При этом использование только традиционных сейсмологических данных зачастую оказывается недостаточным, поскольку значительная часть деформационных процессов протекает без возникновения заметных землетрясений.

В настоящей работе рассматриваются особенности временных рядов микросейсмических наблюдений на территории Предкавказья и проводится анализ их связи с геодинамически активными зонами региона. Основное внимание уделено выявлению устойчивых аномалий микросейсмического поля, оценке их пространственной локализации и возможности использования полученных результатов для прогноза геодинамической активности. Предполагается, что комплексный анализ временных рядов позволяет получить дополнительную информацию о современном состоянии геологической среды и повысить эффективность регионального геодинамического мониторинга.

Основанием для проведения данного исследования послужили как высокая геодинамическая активность региона, так и ограниченность существующих подходов к прогнозированию активных зон на основе традиционных геофизических методов. Полученные результаты могут представлять интерес при решении задач мониторинга опасных геологических процессов и оценки устойчивости территорий в условиях современного геодинамического режима.

Методы и материалы

В качестве исходных данных для проведения исследований использовались временные ряды микросейсмических наблюдений, полученные на территории центральной и восточной частей Предкавказья. Основной объем экспериментального материала был сформирован по данным непрерывной регистрации микросейсмического фона в диапазоне частот 0,1–40 Гц. Продолжительность отдельных серий наблюдений составляла от 30 суток до 18 месяцев, что позволило исследовать как кратковременные вариации сигнала, так и более длительные изменения микросейсмической активности. Дискретность регистрации составляла 100 Гц, а для ряда экспериментальных участков использовался режим повышенной частоты опроса до 200 Гц, позволяющий более детально анализировать высокочастотную часть спектра.

Регистрация микросейсмических колебаний осуществлялась с применением широкополосных сейсмоприемников типа Güralp CMG-6TD, Lennartz LE-3Dlite MkIII и геофонов GS-20DX. Для регистрации и накопления сигнала применялись цифровые станции сбора данных National Instruments NI USB-4431 и NI CompactDAQ с 24-битным аналого-цифровым преобразованием. Средний уровень собственных шумов измерительной системы не превышал 10^{-8} м/с² в рабочем диапазоне частот. Синхронизация временных рядов производилась по GPS-модулям Trimble Resolution T с точностью не хуже 1 мс.

Установка датчиков производилась как в поверхностных пунктах наблюдений, так и в частично заглубленных скважинах глубиной до 12 м. Для уменьшения влияния техногенных помех использовались площадки, удаленные от автомобильных дорог и промышленных объектов не менее чем на 1,5–2 км. При проведении наблюдений температура окружающей среды составляла от –5 до +32 °С, а влажность воздуха изменялась в пределах 40–90 %. Следует отметить, что даже при соблюдении указанных условий полностью исключить влияние внешних шумовых факторов не представлялось возможным.

Первичная обработка сигналов включала удаление тренда, фильтрацию низкочастотных помех и нормализацию амплитудных характеристик. Для полосовой фильтрации использовались цифровые фильтры Баттерворта 4-го порядка с рабочими диапазонами 0,5–20 Гц и 1–10 Гц. Анализ временных рядов производился с использованием программных комплексов MATLAB R2023b, Python 3.11 с библиотеками ObsPy, SciPy и NumPy, а также пакета OriginPro 2024. Спектральный анализ выполнялся методом быстрого преобразования Фурье с длиной окна 4096–8192 отсчетов и перекрытием 50 %. Для оценки устойчивости спектральных аномалий применялось скользящее усреднение по временным интервалам продолжительностью от 30 минут до 24 часов.

При исследовании пространственного распределения микросейсмической активности использовались методы корреляционного анализа и построения карт относительной интенсивности микросейсмического поля. Для визуализации результатов и построения схем геодинамически активных зон применялись программные средства Surfer 25 и QGIS 3.34. Полученные данные сопоставлялись с существующими картами разломной тектоники и региональной сейсмичности Предкавказья, что позволило выявить ряд участков с повышенной геодинамической активностью и устойчивыми аномалиями микросейсмического режима.

Результаты и обсуждение

В ходе обработки временных рядов микросейсмических наблюдений, полученных для различных участков Предкавказья, было установлено, что структура микросейсмического поля региона имеет выраженную пространственную и временную неоднородность. Наиболее интенсивные изменения параметров сигнала наблюдались в районах, приуроченных к крупным тектоническим нарушениям и зонам пересечения разломов. Следует отметить, что даже в периоды отсутствия заметных сейсмических событий в исследуемых временных рядах фиксировались устойчивые изменения спектральных характеристик, которые не носили случайного характера и повторялись на протяжении длительных интервалов наблюдений.

Анализ амплитудно-временных зависимостей показал, что для геодинамически активных участков характерно увеличение среднеквадратических значений микросейсмического сигнала в диапазоне частот 1–8 Гц. В отдельных случаях рост амплитуды составлял 25–40 % относительно фоновых значений. Особенно хорошо подобные изменения проявлялись в районах предполагаемого развития глубинных разломных структур. При этом увеличение интенсивности микросейсмического фона происходило неравномерно. В ряде наблюдений фиксировались квазипериодические колебания амплитуды с характерными интервалами от нескольких часов до 2–3 суток. Подобное поведение сигнала, вероятно, связано с перераспределением напряжений в верхней части земной коры и периодической активизацией локальных деформационных процессов.

При проведении спектрального анализа было установлено, что для большинства исследуемых зон характерно наличие устойчивых максимумов спектральной плотности в области 2–5 Гц (табл. 1). В относительно спокойных районах подобные пики либо отсутствовали, либо имели существенно меньшую выраженность. Кроме того, в активных районах наблюдалось периодическое смещение максимумов спектра в сторону более низких частот. Особенно отчетливо это проявлялось в периоды повышенной региональной микросейсмической активности (рис. 1). Возможно, данный эффект связан с изменением условий распространения упругих волн в породном массиве при росте уровня трещиноватости и локальной разгрузке напряжений.

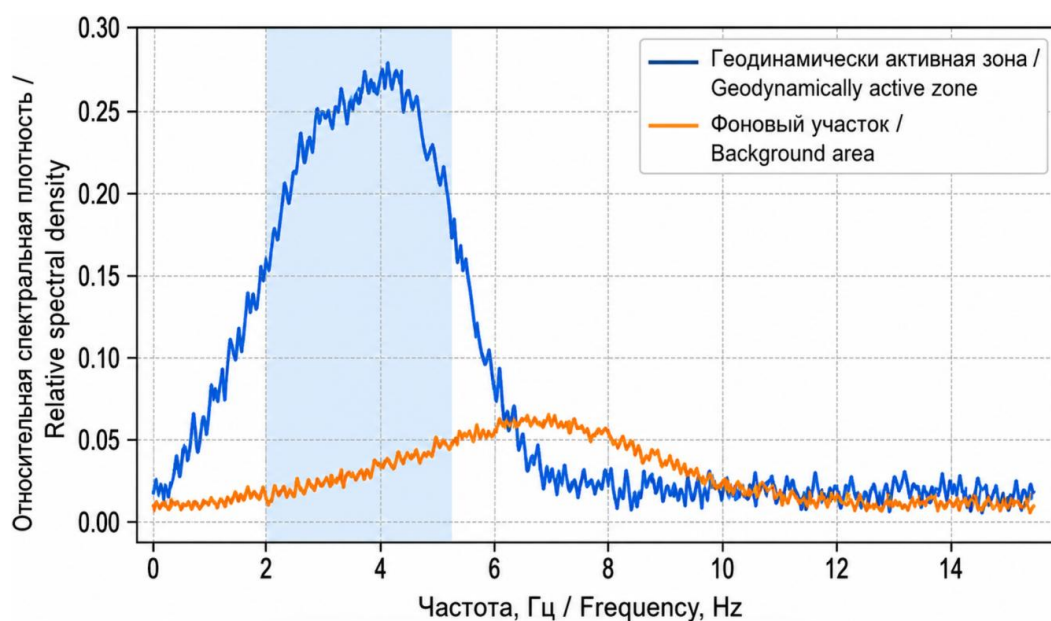


Рис. 1. Пространственное распределение микросейсмической активности на территории Предкавказья /

Fig. 1. Spatial distribution of microseismic activity in the Ciscaucasia

Таблица 1 / Table 1

Основные спектральные характеристики микросейсмических сигналов для различных участков Предкавказья /
Main spectral characteristics of microseismic signals for different areas of the Ciscaucasia

Район наблюдений / Observation area	Средняя амплитуда сигнала, мкм/с / Average signal amplitude, $\mu\text{m/s}$	Доминирующий диапазон частот, Гц / Dominant frequency range, Hz	Среднее значение спектральной плотности / Average spectral density value	Характер микросейсмической активности / Character of microseismic activity
Центральное Предкавказье / Central Ciscaucasia	0,84	2–5	0,73	Устойчиво повышенная / Stably elevated
Восточное Предкавказье / Eastern Ciscaucasia	0,61	3–7	0,58	Умеренная / Moderate
Район крупных разломов / Major fault zone	1,12	1–4	0,94	Высокая / High
Фоновый участок / Background area	0,37	6–12	0,29	Низкая / Low
Предгорные зоны / Foothill zones	0,69	2–6	0,64	Переменная / Variable

Интересные результаты были получены при сравнении временных рядов, зарегистрированных на различных пунктах наблюдений. Для станций, расположенных в пределах предполагаемых активных тектонических зон, коэффициенты взаимной корреляции сигнала достигали 0,65–0,82 (табл. 2). В то же время для удаленных

участков значения корреляции обычно не превышали 0,3–0,4. Это указывает на наличие регионально связанных процессов, влияющих на формирование микросейсмического поля. Следует заметить, что максимальные коэффициенты корреляции наблюдались не в периоды наиболее сильных амплитуд сигнала, а при относительно стабильном микросейсмическом режиме. Вероятно, в этот момент происходило формирование устойчивых деформационных процессов в пределах отдельных блоков земной коры.

Таблица 2 / Table 2

**Корреляционные характеристики временных рядов
микросейсмических наблюдений /
Correlation characteristics of time series of microseismic observations**

Пункты наблюдений / Observation stations	Расстояние между пунктами, км / Distance between stations, km	Коэффициент корреляции / Correlation coefficient	Наличие общей аномалии / Presence of a common anomaly	Геодинамическая характеристика / Geodynamic characteristic
Пункт А – Пункт В / Station A – Station B	18	0,82	Да / Yes	Активная разломная зона / Active fault zone
Пункт В – Пункт С / Station B – Station C	34	0,71	Да / Yes	Область повышенной трещиноватости / Zone of increased fracturing
Пункт С – Пункт D / Station C – Station D	56	0,48	Частично / Partially	Умеренная активность / Moderate activity
Пункт D – Пункт E / Station D – Station E	72	0,31	Нет / No	Фоновый участок / Background area
Пункт А – Пункт E / Station A – Station E	95	0,22	Нет / No	Геодинамически спокойная зона / Geodynamically stable zone

Следует отдельно отметить влияние сезонных факторов на структуру микросейсмического поля. В летний период уровень низкочастотного шума возрастал в среднем на 15–20 %, что вероятно связано как с климатическими причинами, так и с увеличением техногенной активности. Вместе с тем наиболее устойчивые аномалии, наблюдаемые в пределах геодинамически активных зон, сохранялись вне зависимости от сезона. Это позволяет считать их не случайными внешними помехами, а отражением внутренних процессов в геологической среде. В некоторых случаях увеличение микросейсмической активности предшествовало локальным слабым сейсмическим событиям за 2–5 суток. Подобная закономерность наблюдалась не всегда, однако повторяемость такого эффекта на нескольких независимых участках представляет определенный интерес с точки зрения прогноза геодинамической активности.

При анализе пространственного распределения микросейсмической энергии было установлено, что наиболее контрастные аномалии совпадают с зонами повы-

шенной плотности разломных нарушений. Особенно отчетливо это проявилось для центральной части Предкавказья, где наблюдалось формирование вытянутых областей повышенной микросейсмической активности северо-западного направления. Геометрия этих аномалий хорошо согласуется с известными элементами региональной тектоники. В пределах некоторых участков ширина подобных зон достигала 10–15 км, а протяженность превышала 70 км. Следует заметить, что внутри таких областей структура микросейсмического поля была крайне неоднородной. Отдельные локальные участки демонстрировали резкое увеличение энергии сигнала, тогда как соседние территории оставались относительно спокойными.

Полученные результаты показывают, что временные ряды микросейсмических наблюдений обладают высокой чувствительностью к изменениям состояния геологической среды. При этом наиболее информативными оказались не абсолютные значения амплитуд, а особенности их временной изменчивости и спектральной структуры. В частности, для активных зон характерно сочетание нескольких признаков одновременно: рост низкочастотной составляющей сигнала, увеличение дисперсии временных рядов, появление устойчивых спектральных максимумов и повышение корреляции между соседними пунктами наблюдений. Отдельно каждый из этих признаков может быть вызван различными внешними факторами, однако их совместное проявление значительно повышает вероятность связи наблюдаемых эффектов с геодинамическими процессами.

Следует отметить, что интерпретация микросейсмических данных осложняется высокой чувствительностью сигнала к техногенным воздействиям. Вблизи населенных пунктов и транспортной инфраструктуры наблюдалось существенное увеличение уровня шума в диапазоне 8–20 Гц. В отдельных случаях техногенные помехи практически полностью перекрывали естественный микросейсмический фон. По этой причине часть временных рядов была исключена из дальнейшего анализа. Вместе с тем даже в условиях значительного уровня внешнего шума для ряда участков удавалось выделять устойчивые аномальные изменения спектральных характеристик, не связанные с режимом работы промышленных объектов или транспортной нагрузкой.

Интересно, что некоторые выявленные аномалии сохранялись на протяжении нескольких месяцев практически без заметного изменения параметров. Это может свидетельствовать о длительном существовании локальных зон повышенного напряженного состояния. Подобные участки потенциально представляют интерес как области возможной концентрации деформационных процессов. В то же время ряд аномалий носил кратковременный характер и исчезал спустя несколько суток после появления. Вероятно, такие изменения связаны с локальными процессами перераспределения напряжений и частичной релаксацией породного массива.

Сопоставление полученных результатов с данными региональной сейсмичности показывает, что зоны повышенной микросейсмической активности далеко не всегда совпадают с районами возникновения сильных землетрясений. В ряде случаев наиболее выраженные аномалии наблюдались в районах относительно слабой современной сейсмичности. Это может объясняться тем, что значительная часть деформационных процессов в земной коре реализуется без формирования крупных сейсмических очагов. Подобный результат хорошо согласуется с представлениями о существовании медленных геодинамических процессов, сопровождающихся накоплением деформаций без развития выраженных разрывных нарушений.

В целом проведенные исследования показывают, что анализ временных рядов микросейсмических наблюдений позволяет выявлять скрытые особенности современного геодинамического режима Предкавказья. Использование комплексного подхода, включающего спектральный, корреляционный и пространственный анализ

сигналов, дает возможность выделять зоны потенциально повышенной геодинамической активности даже при отсутствии выраженных сейсмических событий. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения микросейсмического мониторинга для задач оценки состояния геологической среды и прогноза активизации деформационных процессов в пределах сложных тектонических регионов.

Выводы

Проведенные исследования временных рядов микросейсмических наблюдений на территории Предкавказья показали, что параметры микросейсмического поля обладают выраженной чувствительностью к современным геодинамическим процессам и могут использоваться для выявления зон повышенной тектонической активности. Установлено, что для геодинамически активных районов характерно устойчивое увеличение амплитуды микросейсмического сигнала в диапазоне частот 1–8 Гц, а также наличие выраженных спектральных максимумов в области 2–5 Гц.

В ходе анализа экспериментальных данных выявлено существование пространственно устойчивых микросейсмических аномалий, совпадающих с районами развития крупных тектонических нарушений и зон повышенной трещиноватости породного массива. Для подобных участков наблюдалось увеличение уровня корреляции между временными рядами соседних пунктов наблюдений, что свидетельствует о наличии связанных региональных деформационных процессов.

Установлено, что изменение спектральной структуры микросейсмического сигнала нередко предшествует локальным слабосейсмическим событиям и сопровождается ростом низкочастотной составляющей микросейсмического фона. При этом часть зарегистрированных аномалий не имела прямой связи с землетрясениями, что позволяет предположить их связь с медленными деформационными процессами в верхней части земной коры.

Показано, что использование комплексной обработки временных рядов, включающей спектральный, корреляционный и пространственный анализ, позволяет существенно повысить информативность микросейсмического мониторинга. Наиболее достоверные результаты достигаются при совместном анализе нескольких параметров сигнала, поскольку отдельные характеристики могут существенно зависеть от сезонных и техногенных факторов.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения методов микросейсмического мониторинга для прогноза геодинамически активных зон Предкавказья и оценки современного напряженно-деформированного состояния геологической среды. Разработанный подход может использоваться при решении задач регионального геодинамического контроля, мониторинга потенциально опасных тектонических процессов и оценки устойчивости территорий в пределах сложных геодинамических регионов.

Литература

1. Адушкин В.В., Спивак А.А. Роль тектонических нарушений в межгеосферных взаимодействиях на границе земной коры и атмосферы // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 402. № 1. – С. 92–97.
2. Рассказов Ю.И., Петров В.А., Гладырь А.В., Тюрин Д.В. Геодинамический полигон Стрельцовского рудного поля: практика и перспективы // Горный журнала. – 2018. – № 7. – С. 17–21. DOI: 10.17580/gzh.2018.07.02.
3. Семинский К.Ж., Добрынина А.А., Борняков С.А., Саньков В.А., Поспеев А.В., Рассказов С.В., Перевалова Н.П., Семинский И.К., Лухнев А.В., Бобров А.А., Чебыкин Е.П., Едемский И.К., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Король С.А. Комплексный мо-

ниторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты // Геодинамика и тектонофизика. – 2022. – Т. 13. № 5. – 0677. DOI: 10.5800/GT-2022-13-5-0677.

4. Asanuma H., Kumano Y., Izumi T., Soma N., Kaieda H., Aoyagi Y., Tezuka K., Wyborn D., Niitsuma H. Microseismic monitoring of a stimulation of HDR reservoir at Cooper Basin, Australia, by the Japanese team // Transactions – Geothermal Resources Council. – 2004. – Vol. 28. – pp. 191–195.

5. Attila Csaba A.C.S., Bujdosó E., Csabafi R., Hegedus E., Torok I., Toth I. First result of the seismic monitoring of Mecsek Mountains // In: 8th Congress of the Balkan Geophysical Society (BGS 2015). Chania, Greece, 2015. – pp. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.201414237.

6. Baisch S., McMahon A. Seismic real-time monitoring of a massive hydraulic stimulation of a geothermal reservoir in the Cooper Basin, Australia // EAGE/DGG Workshop: Microseismic Monitoring. – 2014. pp. 1–15. DOI: 10.3997/2214-4609.20140005.

7. Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Shagun A.N., Sankov V.A., Salko D.V., Miroshnichenko A.I., Vstovsky G.V., Sintsov A.E. On similarities between deformation processes preceding ice shocks and tectonic earthquakes // Report Earth Sciences. – 2023. – Vol. 508. No. 2. – pp. 91–96. DOI: 10.1134/S1028334X22602097.

8. Eremenko A.A., Mulev S.N., Shtirts V.A. Microseismic Monitoring of Geodynamic Phenomena in Rockburst-Hazardous Mining Conditions // Journal of Mining Science. – 2022. – Vol. 58. No. 1. – pp. 10–19. DOI: 10.1134/S1062739122010021.

9. Ergun T., Akkoyunlu M.F., Aksari D., Poyraz S.A., Cambaz M.D., Cok O., Gunes Y., Kalafat D., Kekovali K., Koseoglu A., Ogutcu Z., Ozel N.M., Ozer M., Polat R., Suvarikli M., Teoman U.M., Turhan F. Monitoring and Station Health of Türkiye – KOERI Stations and Their Contribution to AdriaArray Seismic Network // Annals of Geophysics. – 2025. – Vol. 68. No. 5. DOI: 10.4401/ag-9317.

10. Khmelinin A.P., Konurin A.I., Konurina M.I. Justification of electromagnetic scanning of oil-filled formation using downhole matrix antenna arrays // In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 773. No. 1. – Art. No. 012091. DOI: 10.1088/1755-1315/773/1/012091.

11. Lin H., Zhang Q., Duan K., Wang P., Zhang X., Liu C., Chen C., Zhao Y. Geo-mechanical model test on strong mine tremors induced by the breakage of high thick-and-hard overlying strata during longwall coal retreat mining // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2025. – Vol. 58. No. 5. – pp. 5549–5578. DOI: 10.1007/s00603-025-04412-z.

12. Rong H., Wei S., Zhang H., Chen L., Li N. Influencing factors and distribution characteristics of rock burst under complex geological dynamic environment // Coal Science and Technology. – 2025. – Vol. 53. No. 3. – pp. 420–431. DOI: 10.12438/cst.2024-1129.

13. Serdyukov S.V., Azarov A.V., Dergach P.A., Duchkov A.A. Equipment for microseismic monitoring of geodynamic processes in underground hard mineral mining // Journal of Mining Science. – 2015. – Vol. 51. No. 3. – pp. 634–640. DOI: 10.1134/S1062739115030291.

14. Shestopalov V., Kril T. Analysis of depression structures dynamic by remote sensing data // In: Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Monitoring 2022): Materials 16th International Conference. Kiev, Ukraine, 2022. DOI: 10.3997/2214-4609.2022580195.

15. Wu C., Liao J., Yuan G., Li L., Wen A., Xia C. Effect of pre-existing faults on spatio-temporal evolution of in-situ stress and microseismic distribution // Earth Science – Journal of China University of Geosciences. – 2025. – Vol. 50. No. 10. – pp. 4027–4043. DOI: 10.3799/dqkx.2025.164.

References

1. Adushkin V.V., Spivak A.A. Role of the tectonic discontinuities in inter-geospheric interactions at the Earth crust-atmosphere boundary. Report Academies of Sciences. 2005. Vol. 402. No. 1. pp. 92–97. (In Russ.)

2. Rasskazov I.Y., Petrov V.A., Gladyr A.V., Tyurin D.V. Geodynamic test site in the Streltsovsky ore field: Practice and prospects. Gornyi Zhurnal. 2018. No. 7. pp. 17–21. DOI: 10.17580/gzh.2018.07.02. (In Russ.)

3. Seminsky K.Zh., Dobrynina A.A., Bornyakov S.A., Sankov V.A., Pospeev A.V., Rasskazov S.V., Perevalova N.P., Seminskiy I.K., Lukhnev A.V., Bobrov A.A., Chebykin E.P., Edemskiy I.K., Ilyasova A.M., Salko D.V., Sankov A.V., Korol S.A. Integrated monitoring of hazardous geological processes in Pribaikalye: pilot network and first results. *Geodynamics and Tectonophysics*. 2022. Vol. 13. No. 5. Art. No. 0677. DOI: 10.5800/GT-2022-13-5-0677. (In Russ.)
4. Asanuma H., Kumano Y., Izumi T., Soma N., Kaieda H., Aoyagi Y., Tezuka K., Wyborn D., Niitsuma H. Microseismic monitoring of a stimulation of HDR reservoir at Cooper Basin, Australia, by the Japanese team. *Transactions – Geothermal Resources Council*. 2004. Vol. 28. pp. 191–195.
5. Attila Csaba A.C.S., Bujdoso E., Csabafi R., Hegedus E., Torok I., Toth I. First result of the seismic monitoring of Mecsek Mountains. In: 8th Congress of the Balkan Geophysical Society (BGS 2015). Chania, Greece. 2015. pp.1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.201414237.
6. Baisch S., McMahon A. Seismic real-time monitoring of a massive hydraulic stimulation of a geothermal reservoir in the Cooper Basin, Australia. *EAGE/DGG Workshop: Microseismic Monitoring*. 2014. pp. 1–15. DOI: 10.3997/2214-4609.20140005.
7. Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Shagun A.N., Sankov V.A., Salko D.V., Miroshnichenko A.I., Vstovsky G.V., Sintsov A.E. On similarities between deformation processes preceding ice shocks and tectonic earthquakes. *Report Earth Sciences*. 2023. Vol. 508. No. 2. pp. 91–96. DOI: 10.1134/S1028334X22602097.
8. Eremenko A.A., Mulev S.N., Shtirts V.A. Microseismic Monitoring of Geodynamic Phenomena in Rockburst-Hazardous Mining Conditions. *Journal of Mining Science*. 2022. Vol. 58. No. 1. pp. 10–19. DOI: 10.1134/S1062739122010021.
9. Ergun T., Akkoyunlu M.F., Aksari D., Poyraz S.A., Cambaz M.D., Cok O., Gunes Y., Kalafat D., Kekovali K., Koseoglu A., Ogutcu Z., Ozel N.M., Ozer M., Polat R., Suvarikli M., Teoman U.M., Turhan F. Monitoring and Station Health of Turkiye – KOERI Stations and Their Contribution to AdriaArray Seismic Network. *Annals of Geophysics*. 2025. Vol. 68. No. 5. DOI: 10.4401/ag-9317.
10. Khmelinin A.P., Konurin A.I., Konurina M.I. Justification of electromagnetic scanning of oil-filled formation using downhole matrix antenna arrays. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 773. No. 1. Art. No. 012091. DOI: 10.1088/1755-1315/773/1/012091.
11. Lin H., Zhang Q., Duan K., Wang P., Zhang X., Liu C., Chen C., Zhao Y. Geo-mechanical model test on strong mine tremors induced by the breakage of high thick-and-hard overlying strata during longwall coal retreat mining. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2025. Vol. 58. No. 5. – pp. 5549–5578. DOI: 10.1007/s00603-025-04412-z.
12. Rong H., Wei S., Zhang H., Chen L., Li N. Influencing factors and distribution characteristics of rock burst under complex geological dynamic environment. *Coal Science and Technology*. 2025. Vol. 53. No. 3. pp. 420–431. DOI: 10.12438/cst.2024-1129.
13. Serdyukov S.V., Azarov A.V., Dergach P.A., Duchkov A.A. Equipment for microseismic monitoring of geodynamic processes in underground hard mineral mining. *Journal of Mining Science*. 2015. Vol. 51. No. 3. pp. 634–640. DOI: 10.1134/S1062739115030291.
14. Shestopalov V., Kril T. Analysis of depression structures dynamic by remote sensing data. In: *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Monitoring 2022): Materials 16th International Conference*. Kiev, Ukraine. 2022. DOI: 10.3997/2214-4609.2022580195.
15. Wu C., Liao J., Yuan G., Li L., Wen A., Xia C. Effect of pre-existing faults on spatio-temporal evolution of in-situ stress and microseismic distribution. *Earth Science – Journal of China University of Geosciences*. 2025. Vol. 50. No. 10. pp. 4027–4043. DOI: 10.3799/dqkx.2025.164.

УДК 550.83:004.8

DOI: 10.46698/VNC.2026.48.42.001

Оригинальная статья

Применение методов машинного обучения для автоматизированной классификации магнитных аномалий Северного Кавказа по данным аэрогеофизической съемки

В.С. Тынченко¹, М.В. Журавлев², Н.А. Ягудаева²,
В.В. Торопцев², А.Г. Григорян³

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: vadimond@mail.ru;

² Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Россия, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, e-mail: jouravl@rambler.ru, n.yagudaeva@rgau-msha.ru, toroptsev@rgau-msha.ru;

³ Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, Россия, 353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 9, e-mail: grigoryan.anyu2015@yandex.ru

Статья поступила: 04.03.2026, доработана: 05.05.2026, принята к публикации: 12.05.2026

Резюме: Актуальность работы. Повышение точности определения коллекторских свойств нефтегазовых пород по данным геофизических исследований скважин является важной задачей современной нефтегазовой геофизики. Традиционные методы интерпретации не всегда обеспечивают надежный прогноз фильтрационно-емкостных характеристик в условиях высокой литологической неоднородности продуктивных пластов. **Цель исследования.** Оценка эффективности применения нейросетевых алгоритмов для прогнозирования пористости и проницаемости пород-коллекторов по данным геофизических исследований скважин. **Методы исследования.** Использованы данные гамма-, нейтронного, акустического, плотностного и электрического каротажа, а также результаты лабораторных исследований керна. Выполнены предварительная фильтрация, нормализация и корреляционный анализ данных. Для прогнозирования коллекторских свойств применялась многослойная нейронная сеть типа MLP. Результаты сопоставлялись с традиционными методами интерпретации и другими алгоритмами машинного обучения. **Результаты.** Установлено, что использование нейросетевых алгоритмов обеспечивает более высокую точность прогноза коллекторских свойств по сравнению с классическими подходами. Коэффициент детерминации модели достигал 0,89, а среднеквадратичная ошибка прогноза пористости составила около 2,1 %. Наибольшее влияние на качество прогноза оказывают данные акустического, нейтронного и плотностного каротажа. Полученные результаты подтверждают перспективность применения технологий искусственного интеллекта для цифровой интерпретации геолого-геофизической информации.

Ключевые слова: магнитные аномалии, аэрогеофизическая съемка, машинное обучение, классификация, нейронные сети, геофизика, Северный Кавказ, магнитное поле, Random Forest, геологическая интерпретация.

Для цитирования: Тынченко В.С., Журавлев М.В., Ягудаева Н.А., Торопцев В.В., Григорян А.Г. Применение методов машинного обучения для автоматизированной классификации магнитных аномалий Северного Кавказа по данным аэрогеофизической съемки. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 108–119. DOI: 10.46698/VNC.2026.48.42.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.48.42.001

Original paper

Application of machine learning methods for automated classification of magnetic anomalies of the North Caucasus based on airborne geophysical survey data

V.S. Tynchenko¹, M.V. Zhuravlev², N.A. Yagudaeva²,
V.V. Toroptsev², A.G. Grigoryan³

¹ Bauman Moscow State Technical University, 5, 2nd Baumanskaya Str., Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: vadimond@mail.ru, jouravl@rambler.ru, n.yagudaeva@rgau-msha.ru;

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation, e-mail: toroptsev@rgau-msha.ru;

³ Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk 353918, Russian Federation, e-mail: grigoryan.anya2015@yandex.ru

Received: 04.03.2026, revised: 05.05.2026, accepted: 12.05.2026

Abstract: Relevance. The improvement of accuracy of reservoir property prediction accuracy from well logging data is an important task in modern petroleum geophysics. Conventional interpretation methods often fail to provide reliable predictions of reservoir properties in geologically heterogeneous formations. **Aim.** To assess the effectiveness of neural network algorithms for predicting porosity and permeability of reservoir rocks using well logging data. **Methods.** Gamma-ray, neutron, acoustic, density, and electrical logging data, together with laboratory core analysis results, were used. Data preprocessing included filtering, normalization, and correlation analysis. A multilayer perceptron (MLP) neural network was applied for reservoir property prediction. The obtained results were compared with conventional interpretation approaches and other machine learning algorithms. **Results.** The neural network model demonstrated higher prediction accuracy compared with traditional methods. The coefficient of determination reached 0.89, while the root mean square error of porosity prediction was approximately 2.1 %. Acoustic, neutron, and density logging data were identified as the most informative predictors. The results confirm the effectiveness of artificial intelligence technologies for digital interpretation of geological and geophysical information and prediction of reservoir properties in oil and gas-bearing formations.

Keywords: magnetic anomalies; airborne geophysical survey; machine learning; classification; neural networks; geophysics; North Caucasus; magnetic field; Random Forest; geological interpretation.

For citation: Tynchenko V.S., Zhuravlev M.V., Yagudaeva N.A., Toroptsev V.V., Grigoryan A.G. Application of machine learning methods for automated classification of magnetic anomalies of the North Caucasus based on airborne geophysical survey data. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 108–119. DOI: 10.46698/VNC.2026.48.42.001

Введение

Современные методы аэрогеофизической съемки позволяют получать огромные массивы данных о строении земной коры и особенностях распределения магнитного поля. Особенно большое значение магнитная разведка имеет при изучении

сложнопостроенных территорий, к которым относится Северный Кавказ [Yurtsever et al., 2026]. Для данного региона характерно сочетание крупных тектонических нарушений, магматических комплексов различного возраста и зон интенсивной тектонической переработки, что формирует весьма сложную структуру магнитных аномалий [Wang et al., 2025]. В условиях такого разнообразия геологических объектов интерпретация аэромагнитных материалов становится достаточно трудоемкой задачей и требует привлечения большого объема экспертных знаний [Rahmaniar, Suzuki, 2026].

В последние годы объемы аэрогеофизических данных значительно возросли, причем рост связан как с развитием цифровых методов съемки, так и с повышением разрешающей способности оборудования [Ghosh et al., 2026]. Традиционные подходы к анализу магнитных аномалий, основанные преимущественно на ручной интерпретации, уже не всегда позволяют оперативно обрабатывать поступающие данные [Ma, Wang, 2026]. Кроме того, субъективность экспертной оценки может приводить к неоднозначности результатов, особенно в районах со сложным геологическим строением [Shen et al., 2026]. В этой связи всё больший интерес вызывает применение методов машинного обучения для автоматизированного распознавания и классификации геофизических аномалий [Wang et al., 2026a].

Следует отметить, что использование алгоритмов машинного обучения в геофизике развивается достаточно активно [Wang et al., 2026b]. Наиболее часто подобные методы применяются при обработке сейсмических материалов, прогнозировании полезных ископаемых и анализе гравитационных данных [Hui et al., 2025]. Вместе с тем вопросы автоматизированной классификации магнитных аномалий по данным аэрогеофизической съемки для территорий Северного Кавказа пока изучены сравнительно слабо [Teknik, 2026]. При этом именно для данного региона задача имеет практический интерес, поскольку магнитные аномалии тесно связаны с глубинным строением, зонами разломов и магматическими телами [Chen et al., 2026].

Использование методов машинного обучения позволяет выявлять скрытые закономерности в распределении магнитного поля, снижать влияние человеческого фактора и ускорять процесс интерпретации [Кузьмина и др., 2026]. Особенно перспективным представляется применение алгоритмов Random Forest, Support Vector Machine и сверточных нейронных сетей, показывающих высокую эффективность при работе с пространственными данными [Шедько и др., 2026]. Однако качество классификации в значительной степени зависит от подготовки обучающих выборок, особенностей предварительной обработки материалов и выбора признаков пространства [Zhou et al., 2026].

В данной работе рассматривается возможность применения методов машинного обучения для автоматизированной классификации магнитных аномалий Северного Кавказа по данным аэрогеофизической съемки [Fan et al., 2026]. В качестве объекта исследования использованы региональные магнитометрические данные, полученные в пределах Северо-Кавказского региона [Li et al., 2025]. Основной целью исследования является оценка эффективности современных алгоритмов машинного обучения при выделении и классификации различных типов магнитных аномалий [Ye et al., 2025]. Кроме того, отдельное внимание уделено сопоставлению результатов автоматизированной классификации с известными геологическими структурами региона [Ghamizi et al., 2026], что позволяет оценить практическую применимость предложенного подхода для задач региональной геофизики и прогноза перспективных зон минерализации [Tyagi et al., 2026].

Методы и материалы

В качестве исходных материалов исследования использовались цифровые данные аэромагнитной съемки Северного Кавказа, полученные из открытых геофизических архивов и региональных фондовых материалов. Основу массива составляли данные съемок масштаба 1:200000 и 1:50000 с шагом профилей от 250 до 1000 м и средней высотой полета 100–300 м. При проведении предварительной обработки использовались регулярные сетки с размером ячейки 50×50 м и 100×100 м. Обработка и интерпретация материалов выполнялась на вычислительных станциях кафедры «Геоинформационные системы и телекоммуникации» МГТУ им. Н.Э. Баумана с использованием программных комплексов Python 3.11, QGIS 3.34, ArcGIS Pro 3.2, а также библиотек Scikit-learn, TensorFlow и PyTorch. Для вычислений применялись рабочие станции на базе процессоров Intel Xeon Silver и AMD Ryzen 9 с объемом оперативной памяти 64–128 ГБ и графическими ускорителями NVIDIA RTX 4070 и RTX A4000, что является достаточно типичной конфигурацией вычислительных лабораторий университета.

Первичная обработка аэромагнитных данных включала удаление одиночных выбросов, интерполяцию пропусков, фильтрацию высокочастотных шумов и приведение данных к единой системе координат WGS-84/UTM zone 38N. Для сглаживания использовался медианный фильтр с окном 5×5 ячеек, а также гауссов фильтр с параметром $\sigma=1,2-2,0$. При выделении локальных аномалий выполнялись редукция магнитного поля к полюсу, расчет вертикальных и горизонтальных производных, аналитического сигнала и локальной амплитуды поля. Для этого применялись FFT-преобразования с размером окна 2048×2048 и частотой дискретизации 0,01 км⁻¹. В ряде случаев дополнительно использовалась upward continuation на высоты 250, 500 и 1000 м для подавления влияния приповерхностных источников.

Обучающая выборка формировалась на основе ручной интерпретации аномалий и сопоставления их с известными геологическими структурами региона. Всего было подготовлено около 18500 фрагментов магнитных полей размером 64×64 и 128×128 пикселей. Для обучения использовались четыре основных класса: линейные разломные аномалии, локальные магматические объекты, региональные фоновые структуры и зоны смешанного типа. Нормализация входных данных выполнялась методом Min-Max scaling в диапазоне от 0 до 1. Для увеличения устойчивости моделей применялась аугментация данных с поворотами на углы 90°, 180° и 270°, а также зеркальное отражение по осям координат.

В работе исследовались алгоритмы Random Forest, Support Vector Machine и сверточные нейронные сети. Для Random Forest использовалось 300 деревьев решений при максимальной глубине 25. Для метода опорных векторов применялось радиальное ядро RBF с параметром $\gamma=0,01$ и коэффициентом регуляризации $C=10$. Архитектура сверточной нейронной сети включала четыре сверточных слоя с размером ядра 3×3, функцией активации ReLU и слоями MaxPooling 2×2. Обучение сети производилось в течение 120 эпох с использованием оптимизатора Adam при скорости обучения 0,0001 и размере пакета 32 изображения. Среднее время обучения одной модели составляло 3–5 часов в зависимости от объема выборки и используемого графического ускорителя.

Оценка качества классификации проводилась по метрикам accuracy, precision, recall и F1-score. Для контроля переобучения применялось разделение выборки в соотношении 70/15/15 % на обучающую, валидационную и тестовую части. Дополнительно анализировались confusion matrix и пространственное распределение ошибок классификации. Полученные результаты сопоставлялись с существующими геоло-

гическими и тектоническими схемами Северного Кавказа, что позволяло оценить не только статистическую точность моделей, но и геологическую достоверность выделяемых магнитных аномалий.

Результаты

В результате проведенной обработки аэромагнитных данных Северного Кавказа были получены устойчивые закономерности распределения магнитных аномалий, хорошо согласующиеся с известными особенностями геологического строения региона. Уже на этапе предварительной фильтрации данных было установлено, что использование методов машинного обучения позволяет значительно повысить детализацию выделяемых структур по сравнению с традиционной визуальной интерпретацией. Особенно хорошо это проявилось в пределах Центрального и Восточного Кавказа, где наблюдается высокая плотность локальных магнитных неоднородностей, связанных как с глубинными тектоническими нарушениями, так и с магматическими телами различного возраста.

После выполнения процедуры редукции к полюсу и расчета вертикальных производных магнитного поля были выявлены выраженные линейные зоны положительных и отрицательных аномалий, пространственно совпадающие с крупными разломными структурами региона. При этом часть аномалий ранее не была выделена при стандартной интерпретации материалов аэрогеофизической съемки. Особенно интересные результаты были получены в районах Терско-Каспийского прогиба и северных склонов Большого Кавказа, где алгоритмы классификации позволили выделить серию вытянутых магнитных объектов субширотного простирания. Анализ их пространственного положения показывает, что они могут быть связаны с глубинными зонами повышенной трещиноватости и интрузивными образованиями, частично перекрытыми осадочным чехлом.

Следует отметить, что эффективность различных алгоритмов оказалась неодинаковой. Наименее устойчивые результаты показал метод Support Vector Machine. Несмотря на сравнительно высокую точность при классификации простых локальных аномалий, в районах со сложным сочетанием магнитных источников алгоритм начинал давать значительное количество ложных выделений. Особенно это проявлялось в пределах вулканогенных комплексов Центрального Кавказа, где наблюдаются резкие изменения амплитуды магнитного поля на небольших расстояниях. В таких условиях границы между классами становились размытыми и модель начинала переобучаться на отдельных участках обучающей выборки.

Алгоритм Random Forest продемонстрировал более устойчивую работу. Средняя точность классификации составила около 84 %, при этом наилучшие результаты наблюдались для линейных разломных аномалий и крупных магматических тел. Отдельный интерес представляет тот факт, что даже при использовании относительно небольшого числа признаков алгоритм сохранял стабильность классификации. Наиболее информативными признаками оказались амплитуда аналитического сигнала, локальная дисперсия магнитного поля и значения горизонтального градиента. При исключении этих параметров качество классификации снижалось практически на 12–15 %, что указывает на их важную роль при распознавании геологических структур.

Наиболее высокие результаты были получены при использовании сверточных нейронных сетей. Средняя точность классификации достигала 91–93 %, а для отдельных типов аномалий превышала 95 % (табл. 1). Особенно хорошо нейронная сеть выделяла локальные магматические структуры, характеризующиеся сложной

конфигурацией магнитного поля. В отличие от классических методов, нейросетевая модель эффективно распознавала не только амплитудные особенности аномалий, но и их пространственную форму. Это особенно важно для районов Северного Кавказа, где геологические объекты часто имеют сложное блоковое строение и перекрываются более молодыми осадочными толщами.

Таблица 1 / Table 1

**Сравнение эффективности алгоритмов машинного обучения
при классификации магнитных аномалий /
Comparison of the effectiveness of machine learning algorithms in classifying
magnetic anomalies**

Алгоритм / Algorithm	Accuracy, %	Precision, %	Recall, %	F1- score	Среднее время обучения / Average training time
Метод опорных векторов / Support Vector Machine	76,4	74,8	72,9	0,73	48 мин. / 48 min
Случайный лес / Random Forest	84,1	82,7	81,9	0,82	1 ч 15 мин. / 1 h 15 min
CNN (сверточная нейронная сеть) / CNN (Convolutional Neural Network)	92,3	91,7	90,9	0,91	4 ч 12 мин. / 4 h 12 min

В ходе анализа результатов было установлено, что применение аугментации данных оказывает заметное влияние на устойчивость моделей. Без использования поворотов и зеркального отражения качество классификации снижалось примерно на 6–8 %. Вероятно, это связано с тем, что магнитные аномалии региона имеют разное направление простирания, и без расширения обучающей выборки модель хуже адаптируется к пространственным вариациям поля. При этом чрезмерное увеличение объема аугментации также приводило к ухудшению результатов, поскольку часть синтетически преобразованных данных начинала искажать реальные особенности структуры магнитного поля.

Интересные результаты были получены при сопоставлении выделенных аномалий с тектоническими схемами региона. В пределах Скалистого хребта и зоны Передового хребта большинство автоматически распознанных линейных аномалий совпало с известными глубинными нарушениями (табл. 2). Кроме того, нейросетевая модель выделила несколько дополнительных участков повышенной магнитной контрастности, которые ранее не интерпретировались как самостоятельные структуры. Их положение хорошо согласуется с участками повышенной тектонической нарушенности, выделяемыми по данным сейсморазведки и гравиметрии. Это может свидетельствовать о наличии ранее неучтенных разломных зон либо о сложной системе ответвлений крупных глубинных нарушений.

Следует отдельно отметить влияние предварительной обработки данных на результаты классификации. На ранних этапах исследования использовались исходные материалы без фильтрации высокочастотных шумов. В этом случае качество классификации снижалось практически для всех алгоритмов. Особенно чувствительными к шумам оказались сверточные нейронные сети. Несмотря на высокую общую точность, при наличии значительных помех модель начинала выделять большое количество мелких ложных объектов. После применения медианной фильтрации и сгла-

живания гауссовым фильтром устойчивость классификации существенно возросла. Это подтверждает важность качественной подготовки геофизических данных перед использованием методов машинного обучения.

Таблица 2 / Table 2

**Результаты сопоставления автоматически выделенных магнитных аномалий
с геологическими структурами Северного Кавказа /
Results of comparison of automatically identified magnetic anomalies
with geological structures of the North Caucasus**

Район исследования / Study area	Тип выявленных аномалий / Type of identified anomalies	Предполагаемая геологическая природа / Interpreted geological origin	Совпадение с известными структурами / Agreement with known structures
Центральный Кавказ / Central Caucasus	Линейные положительные аномалии / Linear positive anomalies	Глубинные разломы / Deep faults	Высокое / High
Терско-Каспийский прогиб / Terek-Caspian Depression	Вытянутые локальные аномалии / Elongated local anomalies	Интрузивные тела / Intrusive bodies	Среднее / Moderate
Передовой хребет / Fore Range	Зоны магнитной контрастности / Zones of magnetic contrast	Тектонические нарушения / Tectonic faults	Высокое / High
Восточный Кавказ / Eastern Caucasus	Смешанные аномалии / Mixed anomalies	Блоковые структуры / Block structures	Среднее / Moderate
Северные склоны Большого Кавказа / Northern slopes of the Greater Caucasus	Локальные интенсивные аномалии / Local high-intensity anomalies	Магматические комплексы / Magmatic complexes	Высокое / High

При анализе confusion matrix было установлено, что наибольшее число ошибок связано с разделением региональных фоновых структур и зон смешанного типа. Вероятно, это объясняется тем, что подобные участки обладают переходными характеристиками магнитного поля и не имеют четко выраженных границ. В ряде случаев даже экспертная интерпретация таких объектов оказывается неоднозначной. Вместе с тем линейные разломные структуры и локальные интрузии классифицировались достаточно уверенно практически всеми алгоритмами. Это связано с их высокой магнитной контрастностью и сравнительно устойчивой геометрией поля.

В процессе исследований также было установлено, что увеличение размера обучающей выборки положительно влияет на качество работы нейросетевой модели лишь до определенного предела (табл. 3). После достижения объема порядка 15–18 тысяч фрагментов дальнейший рост выборки приводил лишь к незначительному улучшению результатов. При этом резко возрастали время обучения сети и требования к вычислительным ресурсам. На используемых графических ускорителях NVIDIA RTX A4000 полное обучение модели занимало около 4 часов, а при увеличении объема выборки более чем в два раза время обучения возрастало практически линейно. В условиях ограниченных вычислительных ресурсов это может являться важным фактором при практическом внедрении подобных систем.

Таблица 3 / Table 3

**Характеристики обучающей выборки и параметров обработки магнитных данных /
Characteristics of the training sample and magnetic data processing parameters**

Параметр / Parameter	Значение / Value
Масштаб аэромагнитной съемки / Aeromagnetic survey scale	1:50000 – 1:200000
Шаг профилей съемки / Survey line spacing	250–1000 м / 250–1000 m
Высота полета / Flight altitude	100–300 м / 100–300 m
Размер ячейки сетки / Grid cell size	50×50 м; 100×100 м / 50×50 m; 100×100 m
Размер фрагментов выборки / Sample fragment size	64×64; 128×128 пикселей / 64×64; 128×128 pixels
Общее число фрагментов / Total number of fragments	~18500
Количество классов / Number of classes	4
Количество эпох обучения CNN / Number of CNN training epochs	120
Размер batch / Batch size	32
Скорость обучения / Learning rate	0,0001
Используемый GPU / GPU used	NVIDIA RTX A4000

Полученные результаты показывают, что методы машинного обучения действительно могут использоваться для автоматизированной интерпретации аэромагнитных данных Северного Кавказа. При этом особенно перспективным направлением представляется применение сверточных нейронных сетей, позволяющих учитывать пространственную структуру магнитного поля. Вместе с тем полностью исключить участие специалиста-интерпретатора на данном этапе пока невозможно. Часть аномалий требует дополнительного геологического анализа, сопоставления с другими геофизическими методами и экспертной проверки результатов классификации. Особенно это касается переходных зон со сложным сочетанием тектонических и магматических структур.

В целом проведенное исследование показывает, что использование современных методов машинного обучения позволяет существенно повысить скорость обработки аэрогеофизических материалов и снизить влияние субъективного фактора при интерпретации магнитных аномалий. Для регионов со сложным геологическим строением, подобных Северному Кавказу, подобный подход представляет значительный практический интерес. Особенно важным является возможность выявления скрытых структурных элементов, плохо различимых при традиционной обработке магнитных данных. В перспективе развитие подобных методов может быть связано с использованием ансамблевых нейросетевых моделей, совместным анализом магнитных, гравитационных и сейсмических данных, а также внедрением методов самообучения, позволяющих автоматически адаптировать модели к особенностям конкретных геологических районов.

Выводы

В ходе проведенного исследования была рассмотрена возможность применения методов машинного обучения для автоматизированной классификации магнитных аномалий Северного Кавказа по данным аэрогеофизической съемки. Полученные результаты показали, что использование современных алгоритмов обработки данных позволяет существенно повысить эффективность интерпретации магнитного поля в условиях сложного геологического строения региона. Особенно это проявляется при анализе территорий с высокой плотностью тектонических нарушений и неоднородным распределением магматических комплексов.

Установлено, что предварительная обработка аэромагнитных данных оказывает значительное влияние на качество классификации. Применение фильтрации шумов, редукции к полюсу и расчетов производных магнитного поля позволило повысить устойчивость моделей и уменьшить количество ложных выделений. Показано, что без качественной подготовки исходных данных эффективность алгоритмов машинного обучения заметно снижается, особенно для сверточных нейронных сетей.

Сравнение исследованных алгоритмов показало, что наиболее высокую точность классификации обеспечивают сверточные нейронные сети. Средняя точность распознавания магнитных аномалий достигала 91–93 %, что существенно превышает результаты, полученные при использовании методов Support Vector Machine и Random Forest. При этом нейросетевые модели показали высокую устойчивость к сложной пространственной структуре магнитного поля и позволили более уверенно выделять локальные магматические объекты и линейные тектонические зоны.

В процессе сопоставления результатов автоматизированной классификации с геологическими и тектоническими схемами Северного Кавказа установлено хорошее соответствие выделенных магнитных аномалий известным глубинным структурам региона. Кроме того, были обнаружены дополнительные зоны магнитной контрастности, которые могут быть связаны с ранее невыделенными тектоническими нарушениями или скрытыми интрузивными образованиями. Это свидетельствует о высокой перспективности применения методов машинного обучения при региональных геофизических исследованиях и прогнозе перспективных участков минерализации.

Проведенные исследования также показали, что методы машинного обучения не могут полностью заменить геофизическую интерпретацию специалистом, однако позволяют существенно сократить объем ручной обработки данных и снизить влияние субъективного фактора. Наиболее эффективным представляется использование подобных систем в качестве инструмента предварительной интерпретации аэрогеофизических материалов с последующей экспертной проверкой результатов.

В целом результаты работы подтверждают перспективность внедрения интеллектуальных методов анализа геофизических данных в практику региональной геофизики. Дальнейшее развитие данного направления может быть связано с расширением обучающих выборок, использованием ансамблевых нейросетевых моделей, а также совместной обработкой магнитных, гравитационных и сейсмических данных для повышения достоверности выделяемых геологических структур.

Литература

1. Кузьмина А.О., Ильина М.Ю., Лукичев К.Е., Преснякова Н.Г., Татарников А.А. АТТ-CNN картирование порфировых Cu-Mo месторождений Удоканского типа // Горная промышленность. – 2026. – № 1. – С. 135–142. DOI: 10.30686/1609-9192-2026-1-135-142.
2. Шедько Ю.Н., Харченко К.В., Зуденкова С.А., Галкин А.И., Бабаян Л.К. Deep Q-learning в диспетчеризации карьерных самосвалов БелАЗ на месторождениях Курской магнитной аномалии // Горная промышленность. – 2026. – № 1. – С. 105–113. DOI: 10.30686/1609-9192-2026-1-105-113.

3. Chen H., Wu G., Chen H., Xu C., Wu C. Modeling of high-precision sea surface geomagnetic field in the Northern South China Sea Based on PSO-BP neural network // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2026. – Vol. 14. No. 1. – Art. No. 108. DOI: 10.3390/jmse14010108.
4. Fan L., Lin G., Zheng Q., Ni F. Condition monitoring of levitation systems for maglev trains using Bayesian physics-informed neural networks // *Measurement Science and Technology*. – 2026. – Vol. 37. No. 2. – Art. No. 026109. DOI: 10.1088/1361-6501/ae26a7.
5. Ghamizi S., Kanli G., Deng Y., Palissot V., Perquin M., Keunen O. Foundation models for brain imaging: A systematic review // *NeuroImage*. – 2026. – Vol. 333. – Art. No. 121877. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2026.121877.
6. Ghosh J., Thoram S., Sun J., Sager W.W. Enhancing marine magnetic anomaly interpretation with anisotropic diffusion and deep transfer learning // *Scientific Reports*. – 2026. – Vol. 16. No. 1. – Art. No. 1185. DOI: 10.1038/s41598-025-30926-1.
7. Hui R., Liang X., Zuo C., Wang Z. 2D CNN based multifeature fusion detection method for the magnetic anomaly generated by submarine wake // *Journal of Ocean Engineering and Science*. – 2025. – Vol. 10. No. 6. – pp. 1139–1154. DOI: 10.1016/j.joes.2023.11.001.
8. Li Q., Li Z., Wang Z., Lang Y., Liu H., Zhao W. et al. Optical fiber sensor based transportable active seismic survey system solution to OSI // *Pure and Applied Geophysics*. – 2025. – Vol. 182. No. 12. – pp. 5303–5313. DOI: 10.1007/s00024-024-03539-4.
9. Ma L., Wang J. High-precision delineation of curie point depth under remanent magnetization using physics-informed neural networks // *Geophysical Research Letters*. – 2026. – Vol. 53. No. 7. – Art. No. e2025GL120275. DOI: 10.1029/2025GL120275.
10. Rahmaniar W., Suzuki K. Multi-AD: cross-domain unsupervised anomaly detection for medical and industrial applications // *Pattern Recognition*. – 2026. – Vol. 172. – Art. No. 112486. DOI: 10.1016/j.patcog.2025.112486.
11. Shen J., Hou Z., Wei J., Zhao X., Wang J. SDCNet: Stable downward continuation of magnetic anomalies by depth information fusion // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. – 2026. – Vol. 23. – Art. No. 7501505. DOI: 10.1109/LGRS.2026.3657949.
12. Teknik V. Physics-informed neural networks for super-resolution of geospatial data: a case study from the aeromagnetic data of Central Iranian Plateau // *Geophysical Prospecting*. – 2026. – Vol. 74. No. 4. – Art. No. e70175. DOI: 10.1111/1365-2478.70175.
13. Tyagi C., Ansari M.A., Usmani H., Yadav R.K. Recent trends of CNN in medical imaging: a comprehensive analysis // In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Cognitive Computing in Engineering, Communications, Sciences and Biomedical Health Informatics (IC3ECSBHI 2026)*. Greater Noida, India, 2026. – pp. 1625–1630. DOI: 10.1109/IC3ECSBHI67834.2026.11469172.
14. Wang Y.-L., Li C.-S., Zhang H., Wang X.-F. Research on a rapid prediction method for magnetic anomaly responses in the penetration process based on an improved proper orthogonal decomposition (POD)-radial basis function (RBF) neural network // *Measurement*. – 2025. – Vol. 256. – Art. No. 118266. DOI: 10.1016/j.measurement.2025.118266.
15. Wang H., Jiang C., Ren Y., Ding L. Research on magnetic anomaly signal detection based on CNN-LSTM // *Measurement Science and Technology*. – 2026a. – Vol. 37. No. 12. – Art. No. 126111. DOI: 10.1088/1361-6501/ae5334.
16. Wang H., Tang Z., Qi X., Zhang D., Zhao C. A Magnetic anomaly inversion method integrating convolutional block attention module and physical consistency constraints // *Journal of Visualized Experiments*. – 2026b. – No. 229. – Art. No. e69539. DOI: 10.3791/69539.
17. Ye J., Mansour A., Huang F. Enhancing real-time heading estimation for pedestrian navigation via deep learning and smartphone embedded sensors // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. No. 1. – Art. No. 31672. DOI: 10.1038/s41598-025-13390-9.
18. Yurtsever M.M.E., Eken S., Arslan B., Atay Y., Sagioglu S., Celtikci E. et al. Evaluating augmented deep networks for MRI-based brain anomaly classification // *Cluster Computing*. – 2026. – Vol. 29. No. 3. – Art. No. 148. DOI: 10.1007/s10586-025-05893-x.
19. Zhou X., Wang H., Wang Z., Li X., Long Z. Anomaly Detection Method for High-Speed Maglev Train Suspension System Based on Isolation Forest and Improved LSTM // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. – 2026. – Vol. 12. No. 2. – pp. 3907–3919. DOI: 10.1109/TTE.2025.3645233.

References

1. Kuzmina A.O., Ilyina M.Yu., Lukichev K.E., Presnyakova N.G., Tatarnikov A.A. ATT-CNN mapping of the Udokan-type Cu-Mo porphyry deposits. *Mining Industry*. 2026. No. 1. pp. 135–142. DOI: 10.30686/1609-9192-2026-1-135-142. (In Russ.)
2. Shedko Yu.N., Kharchenko K.V., Zudenkova S.A., Galkin A.I., Babayan L.K. Deep Q-learning in traffic control of BelAZ mining dump trucks at the deposits of the Kursk Magnetic Anomaly. *Mining Industry*. 2026. No. 1. pp. 105–113. DOI: 10.30686/1609-9192-2026-1-105-113. (In Russ.)
3. Chen H., Wu G., Chen H., Xu C., Wu C. Modeling of high-precision sea surface geomagnetic field in the Northern South China Sea Based on PSO-BP neural network. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2026. Vol. 14. No. 1. Art. No. 108. DOI: 10.3390/jmse14010108.
4. Fan L., Lin G., Zheng Q., Ni F. Condition monitoring of levitation systems for maglev trains using Bayesian physics-informed neural networks. *Measurement Science and Technology*. 2026. Vol. 37. No. 2. Art. No. 026109. DOI: 10.1088/1361-6501/ae26a7.
5. Ghamizi S., Kanli G., Deng Y., Palissot V., Perquin M., Keunen O. Foundation models for brain imaging: A systematic review. *NeuroImage*. 2026. Vol. 333. Art. No. 121877. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2026.121877.
6. Ghosh J., Thoram S., Sun J., Sager W.W. Enhancing marine magnetic anomaly interpretation with anisotropic diffusion and deep transfer learning. *Scientific Reports*. 2026. Vol. 16. No. 1. Art. No. 1185. DOI: 10.1038/s41598-025-30926-1.
7. Hui R., Liang X., Zuo C., Wang Z. 2D CNN based multifeature fusion detection method for the magnetic anomaly generated by submarine wake. *Journal of Ocean Engineering and Science*. 2025. Vol. 10. No. 6. pp. 1139–1154. DOI: 10.1016/j.joes.2023.11.001.
8. Li Q., Li Z., Wang Z., Lang Y., Liu H., Zhao W. et al. Optical fiber sensor based transportable active seismic survey system solution to OSI. *Pure and Applied Geophysics*. 2025. Vol. 182. No. 12. pp. 5303–5313. DOI: 10.1007/s00024-024-03539-4.
9. Ma L., Wang J. High-precision delineation of curie point depth under remanent magnetization using physics-informed neural networks. *Geophysical Research Letters*. 2026. Vol. 53. No. 7. Art. No. e2025GL120275. DOI: 10.1029/2025GL120275.
10. Rahmaniar W., Suzuki K. Multi-AD: cross-domain unsupervised anomaly detection for medical and industrial applications. *Pattern Recognition*. 2026. Vol. 172. Art. No. 112486. DOI: 10.1016/j.patcog.2025.112486.
11. Shen J., Hou Z., Wei J., Zhao X., Wang J. SDCNet: Stable downward continuation of magnetic anomalies by depth information fusion. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2026. Vol. 23. Art. No. 7501505. DOI: 10.1109/LGRS.2026.3657949.
12. Teknik V. Physics-informed neural networks for super-resolution of geospatial data: a case study from the aeromagnetic data of Central Iranian Plateau. *Geophysical Prospecting*. 2026. Vol. 74. No. 4. Art. No. e70175. DOI: 10.1111/1365-2478.70175.
13. Tyagi C., Ansari M.A., Usmani H., Yadav R.K. Recent trends of CNN in medical imaging: a comprehensive analysis. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Cognitive Computing in Engineering, Communications, Sciences and Biomedical Health Informatics (IC3ECSBHI 2026)*. Greater Noida, India. 2026. pp. 1625–1630. DOI: 10.1109/IC3ECSBHI67834.2026.11469172.
14. Wang Y.-L., Li C.-S., Zhang H., Wang X.-F. Research on a rapid prediction method for magnetic anomaly responses in the penetration process based on an improved proper orthogonal decomposition (POD)-radial basis function (RBF) neural network. *Measurement*. 2025. Vol. 256. Art. No. 118266. DOI: 10.1016/j.measurement.2025.118266.
15. Wang H., Jiang C., Ren Y., Ding L. Research on magnetic anomaly signal detection based on CNN-LSTM. *Measurement Science and Technology*. 2026a. Vol. 37. No. 12. Art. No. 126111. DOI: 10.1088/1361-6501/ae5334.
16. Wang H., Tang Z., Qi X., Zhang D., Zhao C. A Magnetic anomaly inversion method integrating convolutional block attention module and physical consistency constraints. *Journal of Visualized Experiments*. 2026b. No. 229. Art. No. e69539. DOI: 10.3791/69539.

17. Ye J., Mansour A., Huang F. Enhancing real-time heading estimation for pedestrian navigation via deep learning and smartphone embedded sensors. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. No. 1. Art. No. 31672. DOI: 10.1038/s41598-025-13390-9.

18. Yurtsever M.M.E., Eken S., Arslan B., Atay Y., Sagioglu S., Celtikci E. et al. Evaluating augmented deep networks for MRI-based brain anomaly classification. *Cluster Computing*. 2026. Vol. 29. No. 3. Art. No. 148. DOI: 10.1007/s10586-025-05893-x.

19. Zhou X., Wang H., Wang Z., Li X., Long Z. Anomaly Detection Method for High-Speed Maglev Train Suspension System Based on Isolation Forest and Improved LSTM. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2026. Vol. 12. No. 2. pp. 3907–3919. DOI: 10.1109/TTE.2025.3645233.

УДК 553.41

DOI: 10.46698/VNC.2026.51.20.001

Оригинальная статья

Геолого-геофизические условия локализации золотоносных минерализаций Барило-Крепинского рудного поля (Восточный Донбасс)

С.Г. Парада 

Южный научный центр Российской академии наук, Россия, 344006,
г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: segripa@rambler.ru

Статья поступила: 08.04.2026, доработана: 20.05.2026, принята к публикации: 25.05.2026

Резюме: **Актуальность** определяется необходимостью дальнейшего изучения геолого-геофизических условий локализации золотоносных минерализаций перспективного эпитермального типа в пределах Барило-Крепинского рудного поля. **Цель** настоящей статьи – показать особенности геологического строения рудного поля, геолого-структурные и литологические факторы контроля золотоносных минерализаций и их отображение в потенциальных полях. **Материал и методы.** В основу настоящей статьи положены материалы, полученные в ходе геологического картирования и поисковых работ в южной части Восточного Донбасса, выполненных в различные годы разными производственными организациями. Также использованы результаты аэрогеофизических работ 2012 г. При обработке исходных данных использованы методы металлогенического анализа рудоконтролирующих факторов, пространственный анализ связи рудных минерализаций с аномалиями потенциальных полей, статистический анализ геохимических данных. **Результаты.** Установлено, что основными тектоническими структурами, контролирующими размещение золотоносной прожилково-вкрапленной сульфидной минерализации, являются продольные разрывные нарушения. Они имеют широтное простирание и протягиваются на расстояние до 1 км. Областью локализации золотоносных минерализаций являются пакеты коротких поперечных разрывов северо-восточной ориентировки типа сбросо-сдвигов, примыкающих к основному продольному разлому. В целом, пакеты поперечных нарушений представлены присдвиговыми трансензионными структурами. Золотоносными являются области развития кварц-анкерит-сульфидной прожилково-вкрапленной минерализации с максимальным развитием золото-арсенопирит-пиритовой ассоциации и поздних галенит-сфалеритовой и тетраэдритовой ассоциаций. Площадь потенциального рудного поля сложена немагнитными терригенными образованиями каменноугольного возраста, которым соответствует слабоконтрастное магнитное поле низкой интенсивности (от –30 до +40 нТл). Также каменноугольные образования характеризуются низким кажущимся удельным электрическим сопротивлением (от 50 до 350 Ом·м). Вкрапленная сульфидная минерализация проявляется в аномалиях кажущейся поляризуемости относительно высокой интенсивности (4–7 %). При этом золотоносная прожилково-вкрапленная кварц-анкерит-сульфидная минерализация проявлена в аномалиях кажущейся поляризуемости относительно низкой интенсивности (3–4 %).

Ключевые слова: золото, полиметаллы, металлогенический анализ, рудоконтролирующие факторы, геохимические ассоциации, потенциальные поля, Восточный Донбасс.

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ЮНЦ РАН, № госрегистрации 125011700412-6.

Для цитирования: Парада С.Г. Геолого-геофизические условия локализации золотоносных минерализаций Барило-Крепинского рудного поля (Восточный Донбасс). *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 120–131. DOI: 10.46698/VNC.2026.51.20.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.51.20.001

Original paper

Geological and geophysical conditions for localization of gold-bearing mineralizations of the Barilo-Krepin ore field (Eastern Donbass)

S.G. Parada 

Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Ave.,
Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation, e-mail: segripa@rambler.ru

Received: 08.04.2026, revised: 20.05.2026, accepted: 25.05.2026

Abstract: The relevance is determined by the need to further study the geological and geophysical conditions of localization of gold-bearing mineralizations of a promising epithermal type within the Barilo-Krepin ore field. **The aim** of this article is to show the features of the geological structure of the ore field, the geological, structural and lithological factors controlling gold-bearing mineralizations and their representation in potential fields. **Materials and methods.** This article is based on materials obtained during geological mapping and prospecting operations in the southern part of Eastern Donbass, carried out in different years by different production organizations. The results of aerogeophysical work in 2012 were also used. When processing the initial data, methods of metallogenic analysis of ore-controlling factors, spatial analysis of the relationship of ore mineralization with anomalies of potential fields, and statistical analysis of geochemical data were used. **Results.** It has been established that the main tectonic structures controlling the placement of gold-bearing veined-interspersed sulfide mineralization are longitudinal discontinuous faults. They have a latitudinal extent and extend over a distance of up to 1 km. The area of localization of gold-bearing mineralizations is sets of short transverse ruptures of the northeastern orientation of the type of displacements adjacent to the main longitudinal fault. In general, the sets of transverse disturbances are represented by near-displacement transtension structures. The areas of quartz-ankerite-sulfide veined-interspersed mineralization with the maximum development of the gold-arsenopyrite-pyrite association and the late galena-sphalerite and tetrahedrite associations are gold-bearing. The area of the potential ore field is composed of non-magnetic terrigenous formations of Carboniferous age, which correspond to a low-contrast magnetic field of low intensity (from –30 to +40 nTl). Carboniferous formations are also characterized by a low apparent electrical resistivity (from 50 to 350 $\Omega\cdot m$). Interspersed sulfide mineralization manifests itself in anomalies of apparent polarizability of relatively high intensity (4–7 %). At the same time, gold-bearing veined quartz-ankerite-sulfide mineralization is manifested in anomalies of apparent polarizability of relatively low intensity (3–4 %).

Keywords: gold, polymetals, metallogenic analysis, ore-controlling factors, geochemical associations, potential fields, Eastern Donbass.

Acknowledgements: The work was performed as part of the implementation of the state assignment of the UNC RAS, No. 125011700412-6.

For citation: Parada S.G. Geological and geophysical conditions for localization of gold-bearing mineralizations of the Barilo-Krepin ore field (Eastern Donbass). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 120–131. DOI: 10.46698/VNC.2026.51.20.001

Введение

С конца прошлого столетия в Восточном Донбассе выявлены многочисленные объекты золото-полиметаллического оруденения [Лихачев и др., 1983; Зеленщиков и др., 2006; Давыденко, 2016], которые стали учитываться при оценке минерально-сырьевой базы Восточного Донбасса [Лихачев и др., 2000; Зеленщиков и др., 2001; Невалённый, 2005; Клещенко, Зеленщиков, 2012]. Одной из территорий распространения объектов золото-полиметаллического оруденения является Барило-Крепинское потенциальное рудное поле, перспективы которого не оценены в должной степени.

Рудное поле располагается в южной части Восточного Донбасса, геологическое строение которой охарактеризовано в единичных опубликованных работах [Государственная ..., 2000; Saintot et al., 2003; Granovsky, 2018 и др.].

Собственно, Барило-Крепинское рудопроявление расположено в северо-восточной части рудного поля и связано с серией кварцевых и кварц-анкеритовых жил, достигающих по мощности 0,5 м, а по простиранию – 90 м, и содержащих золото-полиметаллическое оруденение, представленное сфалеритом, галенитом, халькопиритом и пиритом. По результатам опробования жил и вмещающих пород, содержания свинца достигают 0,75 %, цинка – 0,98 % (в единичных пробах – до 29,74 %), серебра – 2,6 г/т. Кроме того, установлен обширный шлиховой ореол барита, где постоянно присутствуют галенит, киноварь, иногда самородная медь, куприт, а также установленное в шлиховых ореолах самородное золото. По минеральному составу изучаемое рудопроявление можно отнести к эпитермальным объектам кислотно-сульфатного (высокосульфидизированного) генетического типа, согласно типизации [Wang L. et al., 2019]. Учитывая, что на долю эпитермальных месторождений приходится 8 % мирового производства золота [Frimmel, 2008], Барило-Крепинское рудопроявление заслуживает дальнейшего изучения.

Материал и методы

В основу настоящей статьи положены материалы, полученные в ходе геологического доизучения и проведения поисковых работ в южной части Восточного Донбасса, выполненных в различные годы Ростовской геологоразведочной экспедицией, АО «Южгеология», ООО «Полиметалл», ООО «Северо-Кавказская горно-рудная компания» (СКГРК), а также результаты аэрогеофизических работ 2012 г. При обработке исходных данных использованы методы металлогенического анализа рудоконтролирующих факторов, структурно-тектонический анализ условий локализации продуктивных минерализаций, статистический анализ геохимических данных. Также осуществлен пространственный анализ связи рудных минерализаций с аномалиями потенциальных полей с использованием опыта разделения потенциальных полей Донбасса на фоновую и локальную составляющие [Давыденко, Парада, 2021]. Исследования проведены на площади 17 км², включающей собственно Барило-Крепинское рудопроявление и расположенные юго-западнее Недвижный и Аграфеновский пункты минерализации.

Результаты и обсуждение

Барило-Крепинское рудное поле охватывает наиболее приподнятую часть Южной антиклинали в районе пересечения ее с предполагаемой локальной поперечной структурой (рис. 1).

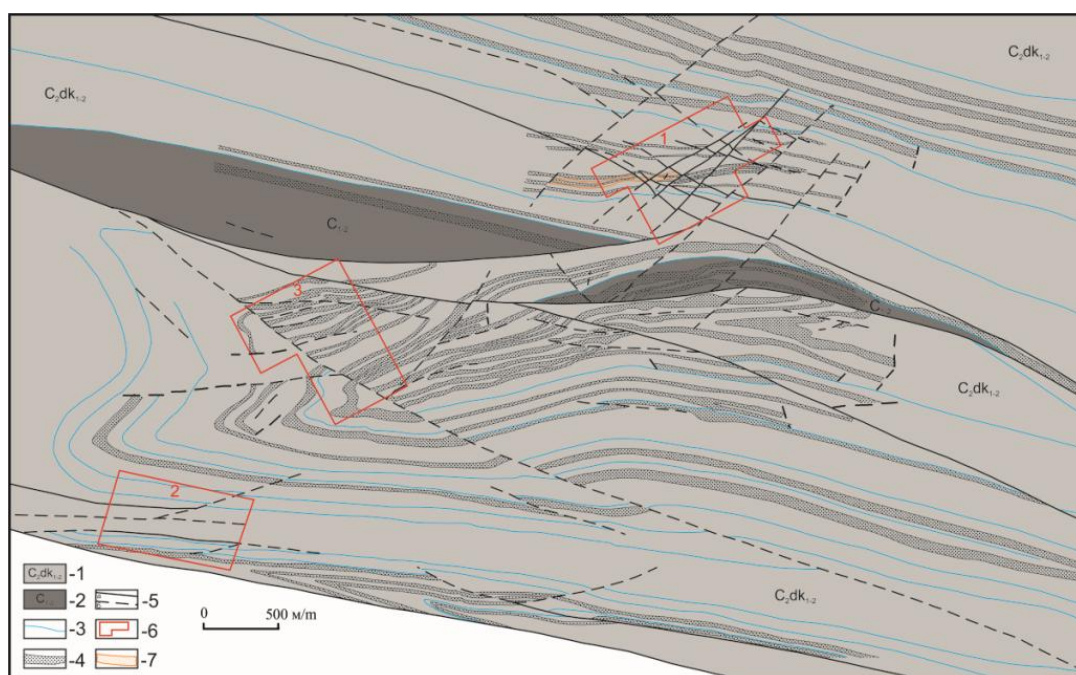


Рис. 1. Геологическая карта Барило-Крепинского рудного поля масштаба 1:10000 с данными по рудоносности (по данным ООО СКГРК с изменениями и дополнениями автора):

1 – 2 – каменноугольная система: 1 – средний отдел, дяковская серия, переслаивание алевролитов, песчаников и аргиллитов, известняки; 2 – нижний-средний отдел, аргиллиты, алевролиты, песчаники, известняки; 3 – горизонты маркирующих известняков; 4 – пласты песчаников; 5 – разрывные нарушения: главные (а), второстепенные (б); 6 – контуры Барило-Крепинского рудопоявления (1), Аграфеновского (2) и Недвижного (3) пунктов минерализации; 7 – рудная зона №1 /

Fig. 1. Geological map of the Barilo-Krepinsky ore field on a scale of 1:10000 with data on ore content (according to SKGRK LLC with changes and additions by the author):

1 – 2 – carboniferous system: 1 – middle section, Dyakov series, interlacing of siltstones, sandstones and mudstones, limestones; 2 – lower-middle section, mudstones, siltstones, sandstones, limestones; 3 – horizons of marking limestones; 4 – sandstone strata; 5 – discontinuous faults: main (a), secondary (b); 6 – contours of the Barilo-Krepinsky ore occurrence (1), Agrafenovsky (2) and Motionless (3) mineralization sites; 7 – ore zone No. 1

В ядре складки обнажаются ниже-среднекаменноугольные породы, представленные нерасчлененной флишеидной толщей, сложенной аргиллитами, алевролитами с прослоями полимиктовых мелко-среднезернистых песчаников. Крылья антиклинали сложены породами нижней и средней толщ дяковской серии, которые представлены ритмично переслаивающимися аргиллитами, алевролитами с отдельными пластами песчаников и редкими прослоями известняков. В южной части площади каменноугольные отложения перекрыты меловыми осадками. На водоразделах развиты известняки-ракушечники, пески нижнего неогена, глины скифской свиты и неоплейстоценовые лессовидные суглинки. Общая мощность рыхлых отложений, перекрывающих каменноугольные породы, на водоразделах может достигать 30–40 м.

Магматические породы в пределах рудного поля не установлены. В структурном отношении рудопоявление приурочено к северному крылу Крепинской антиклинали, которая к северо-востоку, за пределами участка, переходит в Несветаевскую синклиналь с постепенным выполаживанием слоёв от 50° до 15°. Геологическую

структуру рудного поля осложняют многочисленные продольные и поперечные разрывные нарушения. К продольным отнесены нарушения северо-западного простирания, образующие серию субпараллельных разрывов с правосдвиговой кинематикой. К югу от ядра Крепинской антиклинали располагается основной шов Барило-Крепинского разлома, к северу – шов Водяного разлома. Поперечные разрывные нарушения представлены секущими маломощными разломами северо-восточной ориентировки типа сбросо-сдвигов с амплитудами смещения от первых метров до первых десятков метров, возникшими, предположительно, как оперяющие к продольным разрывным нарушениям.

В целом, ареал влияния поперечных нарушений представляет собой тектонически ослабленную зону с множеством примыкающих к основному разлому разрывных нарушений высоких порядков по типу присдвиговых транстензионных структур, охарактеризованных в работе [Sylvester, 1988].

Основной разрывной структурой является Водяной разлом, имеющий прослеженную длину около 4 км и взбросовую амплитуду до 150 м с падением плоскости сместителя на север под углом 70–75°.

В пределах зон смятия породы собраны в мелкие складки, с чередованием участков брекчирования и расщепления, что свидетельствует о локальных изменениях динамических обстановок растяжения и сжатия. Зоны смятия ориентированы субсогласно напластованию пород. Интенсивно развитая трещиноватость сочетается с межпластовыми отслоениями, что послужило благоприятной обстановкой для локализации жильно-прожилковых образований и золотоносных минеральных ассоциаций.

В пределах рудовмещающей толщи минерализованные участки размещаются преимущественно вдоль трещин отслоения вдоль контактов пластов с разными физико-механическими свойствами, а также по трещинам отрыва и скалывания, локализованным в висячем борту Водяного разлома.

Вторая группа нарушений – относительно короткие поперечные (диагональные) сбросы и взбросы северо-восточной ориентировки. С ними связаны фрагментарно проявленные участки развития микропрожилков и брекчий, минерализованных полиметаллическими сульфидами.

Таким образом, установленные факты свидетельствуют о том, что именно продольные разрывные нарушения являются основными рудолокализирующими структурами, контролирующими жильно-прожилковое золото-сульфидное оруденение.

Гидротермально-метасоматическая проработка пород на участке рудопоявления выражена слабо. Повсеместно фиксируется серицитизация (кварц-серицитовые и хлорит-серицит-карбонатные метасоматиты), осветление пород за счет каолинизации, а также ожелезнение, связанное с джаспероидизацией. Среди литологических разностей наиболее серицитизированы алевролиты и аргиллиты, в песчаниках же и аргиллитах с примесью углистого вещества этот процесс заметно ослабевает. Все это подтверждает эпитеермальный характер оруденения.

Жильно-прожилковая минерализация представлена кварцем и анкеритом, местами интенсивно лимонитизированными и кавернозными, и содержит пирит и арсенопирит. Сульфидизация вмещающих пород представлена прожилками и тонкой рассеянной вкрапленностью пирита во вмещающих породах.

По результатам поисковых работ в пределах рудного поля выделены три субпараллельные, кулисно-расположенные минерализованные зоны, вытянутые в субширотном направлении и прослеженные по простиранию до 1 км. Из них наиболее изученной является рудная зона №1 (рис. 2, 3).

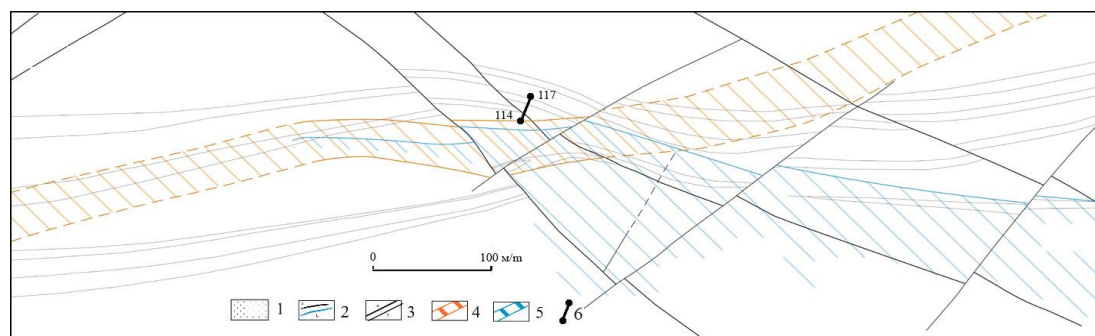


Рис. 2. Геологический план рудной зоны № 1 (по данным ООО СКГРК с дополнениями автора):
 1 – пласты мелкозернистых песчаников и алевропесчаников выдержанной мощности;
 2 – а) прожилковое сульфидное оруденение, б) жилы и прожилки кварцевого, кварц-карбонатного состава с полиметаллическим оруденением; 3 – разрывные нарушения:
 а) главные, б) второстепенные; 4 – контур рудной зоны №1; 5 – контур минерализованной зоны с полиметаллическим оруденением; 6 – буровой профиль по скважинам 114 – 117 /

Fig. 2. Geological plan of ore zone No. 1 (according to the data of SKGRK LLC with additions by the author): 1 – layers of fine-grained sandstones and Aleuroean sandstones of sustained thickness;
 2 – a) veined sulfide mineralization, b) veins and veins of quartz, quartz-carbonate composition with polymetallic mineralization; 3 – discontinuous faults: a) main, b) secondary;
 4 – contour of ore zone No. 1; 5 – contour of mineralized zone with polymetallic mineralization;
 6 – drilling profile for wells 114 – 117

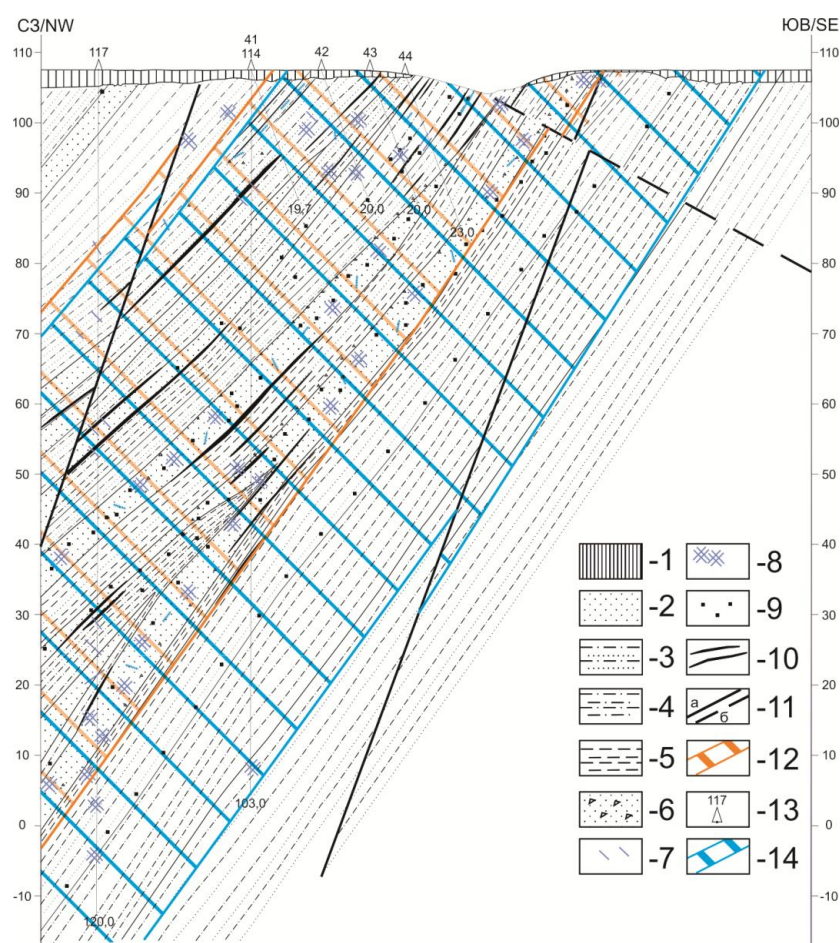


Рис. 3. Геологический разрез по буровому профилю через рудную зону № 1 Барило-Крепинского рудопроявления (по данным ООО СКГРК с дополнениями автора):
 1 – современные рыхлые отложения; 2 – 5 – отложения среднего карбона: 2 – песчаники;

3 – переслаивание аргиллитов, алевролитов и песчаников; 4 – алевролиты; 5 – аргиллиты; 6 – брекчии; 7 – кварц-анкеритовые жилы и прожилки с полиметаллической минерализацией; 8 – разноориентированные прожилки кварца; 9 – залежи и зоны сульфидной вкрапленности; 10 – залежи вкраплено-прожилковой сульфидной минерализации; 11 – разрывные нарушения: а) главные, б) второстепенные; 12 – контур золотоносной рудной зоны №1; 13 – буровые скважины и их номера; 14 – контур зоны полиметаллической сульфидной минерализации /

Fig. 3. Geological section along the drilling profile through the zone No. 1 of the Barilo-Krepinsky ore occurrence (according to the data of SKGRK LLC with additions by the author):

1 – modern loose sediments; 2 – 5 – deposits of the Middle Carboniferous: 2 – sandstones; 3 – interlacing of mudstones, siltstones and sandstones; 4 – siltstones; 5 – mudstones; 6 – breccias; 7 – quartz-ankerite veins and veins with polymetallic mineralization; 8 – differently oriented quartz veins; 9 – deposits and zones of sulfide inclusions; 10 – deposits of interspersed-veined sulfide mineralization; 11 – discontinuous faults: a) main, b) secondary; 12 – contour of gold-bearing ore zone No. 1; 13 – boreholes and their numbers; 14 – contour of polymetallic sulfide mineralization zone

Рудная зона вытянута, в целом, в субширотном направлении, изменяя свое направление на флангах: на западном – к северо-западу, на восточном – к северо-востоку. Мощность минерализованной зоны с золото-сульфидной минерализацией изменчива, с изгибами, апофизами, ответвлениями, достигает в раздуве 30–40 метров. Минерализованная зона протягивается в виде полосы длиной более 1 км, несколько сужаясь и, вероятно, выклиниваясь к востоку. С запада зона ограничена поперечным нарушением северо-восточной ориентировки. Такое положение рудной зоны указывает на рудоконтролирующую роль продольной структурной дислокации (Водяной разлом).

В соответствии с рисунком 3 залегание рудоносной зоны согласное с наложением вмещающих пород, с падением на север под углом 35–55°.

В пределах рудной зоны широко развиты участки интенсивной трещиноватости, смятия, развальцевания и дробления пород, где и локализуются рудные залежи. К трещинам приурочены прожилки, редко – сульфидные жилы мощностью от долей сантиметра до 20–30 см. Зоны смятия сложены линзами, желваками (округлой, шаровидной формы), часто блоками дробленых или рассланцованных вмещающих пород, насыщенных в разной степени маломощными прожилками сплошных сульфидных и вкрапленных руд.

Относительно более редкие зоны дробления выполнены, как правило, тектонической глиной и брекчиями с алевроитисто-кварцевым, кварцевым и смешанным кварц-кабонатным цементом.

Распределение рудной минерализации в рудной зоне №1 неравномерное, представлено чередованием участков сгущения и слабоминерализованных «окон», наблюдаемым и в плане, и в вертикальном сечении. Границы потенциально рудных тел визуально не выделяются, они выявляются только по результатам опробования.

Наибольшая золотоносность установлена на участках развития сульфидизированных (пиритового и пирит-арсенопиритового состава) кварцевых и кварц-анкеритовых прожилков и жил, приуроченных к трещинам отслоения и зонам смятия.

По результатам множественной корреляции в составе рудной минерализации выделяются три геохимические ассоциации (табл. 1): 1) Au, As, S, Fe (соответствует минеральной ассоциации, включающей самородное золото, арсенопирит, пирит с повышенным содержанием мышьяка; 2) Pb, Zn, Cd (соответствует минеральной ассоциации галенит, сфалерит); 3) Cu, Sb, Fe, S (соответствует блеклым рудам в форме тетраэдрита).

Связь тонкодисперсного золота именно с пиритом, отличающимся повышенным содержанием мышьяка, подтверждена неоднократно на примере многих месторождений [Буряк и др., 1987; Large et al., 2011; Large, Maslennikov, 2020].

Таким образом, рудная зона №1 Барило-Крепинского рудопоявления в морфологическом отношении представляет собой жильно-прожилково-вкрапленную минерализованную зону с рассредоточенным относительно бедным золотосульфидным оруденением (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Матрица коэффициентов парной корреляции рудообразующих элементов минерализованной зоны № 1 Барило-Крепинского рудопоявления /
Matrix of coefficients of paired correlation of ore-forming elements of mineralized zone No. 1 of the Barilo-Krepinsky ore occurrence

	Au	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Li	Mn	Mo	Pb	S	Sb	Sr	Zn
Au	1,00														
As	0,91	1,00													
Ba	0,08	0,02	1,00												
Cd	-0,07	-0,08	-0,04	1,00											
Cr	0,10	0,06	-0,01	-0,25	1,00										
Cu	0,11	0,25	-0,07	0,14	-0,16	1,00									
Fe	0,59	0,69	0,15	-0,05	0,16	0,33	1,00								
Li	-0,08	-0,09	0,15	-0,11	0,68	-0,02	0,16	1,00							
Mn	-0,06	-0,07	0,06	-0,13	0,29	-0,28	0,24	0,42	1,00						
Mo	0,16	0,23	0,11	-0,07	-0,07	0,01	0,10	-0,08	-0,26	1,00					
Pb	-0,02	-0,03	-0,04	0,80	-0,17	0,13	-0,06	-0,09	-0,12	-0,16	1,00				
S	0,82	0,95	0,00	-0,08	0,01	0,28	0,60	-0,12	-0,12	0,29	-0,02	1,00			
Sb	0,16	0,29	0,00	0,06	-0,12	0,67	0,42	-0,03	-0,23	0,05	0,06	0,29	1,00		
Sr	0,12	0,02	-0,07	-0,13	0,28	-0,22	0,12	0,37	0,53	-0,21	-0,15	0,01	0,05	1,00	
Zn	-0,14	-0,13	-0,05	0,94	-0,29	0,22	-0,06	-0,10	-0,25	-0,09	0,72	-0,11	0,16	-0,15	1,00

Примечание: число проб – 69. Жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции с вероятностью 99 % /

Note: the number of samples is 69. Significant correlation coefficients with a probability of 99 are highlighted in bold %.

Границы рудной зоны проводятся условно по снижению интенсивности минерализации и исчезновению вкрапленных сульфидов и золота в породах. По минеральному типу золотосодержащие руды относятся к золотосульфидной формации, золото-мышьяковистого геохимического типа.

В юго-западном направлении от Барило-Крепинского рудопоявления, согласно рисунку 1, выделяются Недвижный и Аграфеновский участки развития зон низкотемпературных метасоматитов и вторичных геохимических ореолов рассеяния золота и полиметаллов.

Из них более изученным является Аграфеновский участок. Он располагается в зоне Персиановского глубинного разлома. Здесь отмечается широкое развитие брекчий и метасоматитов пёстрой окраски, обусловленной процессами выветривания. Залегают они в виде линзообразных залежей, заключённых среди менее изменённых алевролитов и аргиллитов. Зона выветривания, по данным бурения, выклинивается на глубине 10–16 м, а глубже брекчии и брекчированные породы выполняют зоны дробления и смятия пород (по оперяющим трещинам отрыва и скалывания) в монотонной аргиллитовой толще, с незначительной степенью гидротермально-метасоматической проработки.

По результатам бурения установлено наличие сульфидной минерализации, развитой в виде тонких прожилков (мощностью 1–3 мм), иногда – с раздувами до 0,5–0,7 см, реже – линзообразными гнездами размером до 1–3 см. Из сульфидов отмечены: пирит, халькопирит, реже – арсенопирит.

Геофизические условия локализации золотоносных минерализаций отображены на рисунке 4.

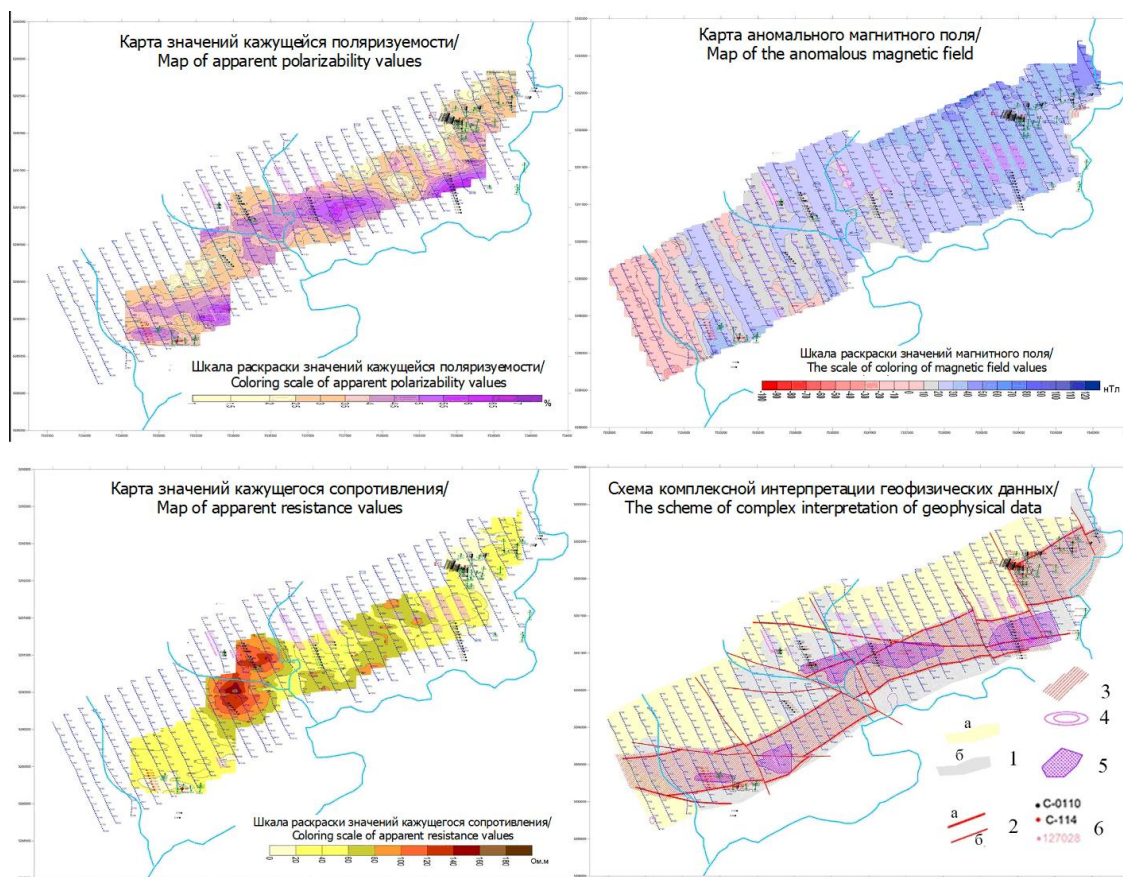


Рис. 4. Проявление золотоносных минерализаций в геофизических полях Барило-Крепинского рудного поля (по данным ООО СКГРК с изменениями и дополнениями автора):

- 1 – области развития: неоген-палеогеновых (а), карбоновых (б) образований;
- 2 – тектонические нарушения, выделенные по геофизическим данным: а – основные, б – прочие;
- 3 – зона поперечного регионального разлома, представляющая интерес на проявление рудной минерализации;
- 4 – аномалии золота вторичных ореолов рассеяния;
- 5 – контуры аномалий кажущейся поляризуемости интенсивностью более 4 %, обусловленных сульфидной минерализацией (глубина верхней кромки 20–30 м), либо углефицированными, графитизированными образованиями, перспективными на золотое оруденение;
- 6 – скважины, пробуренные в разное время и их номера /

Fig. 4. The manifestation of gold-bearing mineralization in the geophysical fields of the Barilo-Krepinsky ore field (according to the data of LLC SKGRK with amendments and additions by the author):

- 1 – areas of development: Neogene-Paleogene (a), carboniferous (b) formations;
- 2 – tectonic disturbances identified by geophysical data: a – major, b – other;
- 3 – a transverse regional fault zone of interest for ore mineralization;
- 4 – gold anomalies of secondary scattering halos;
- 5 – contours of anomalies of apparent polarizability with an intensity of more than 4 % due to sulfide mineralization (depth of the upper edge 20–30 m), or carboniferous, graphitized formations promising for gold mineralization;
- 6 – wells drilled at different times and their numbers

Площадь потенциального рудного поля сложена немагнитными терригенными образованиями каменноугольного возраста, которым соответствует слабоконтрастное низкой интенсивности магнитное поле (от -30 до $+40$ нТл). Отсутствие контрастных положительных магнитных аномалий свидетельствует о том, что в границах участка близповерхностные интрузивные образования не развиты. Вместе с тем, западнее, в сторону Ровеньковского поднятия широко развиты дайки лампрофиров миусско-керчикского интрузивного комплекса, выходы которых хорошо проявляются в линейных аномалиях магнитного поля [Парада, 2023]. Поэтому не

исключается возможное наличие таких даек на более глубоких горизонтах Барило-Крепинского рудного поля.

Также каменноугольные образования характеризуются низким кажущимся удельным электрическим сопротивлением (от 50 до 350 Ом·м). Судя по характеру поля, протяженные зоны окварцевания в объеме изученных терригенных образований не просматриваются.

В юго-западной, центральной и юго-восточной частях Барило-Крепинского рудного поля выделяются аномалии кажущейся поляризуемости повышенной интенсивности от 4 % до 7 %, которые интерпретируются как участки сульфидно-вкрапленной минерализации. В северо-восточной части, где залегает рудная зона №1 с прожилковой золотосульфидной минерализацией, значения кажущейся поляризуемости составляют всего 3–4 %. В центральной части Барило-Крепинского рудного поля выявлена аномалия кажущейся поляризуемости интенсивностью до 7 %, длиной 800 м и шириной от 200 до 400 м. По результатам буровых работ подтверждено, что аномалия обусловлена зоной сульфидной вкрапленности.

В юго-восточной части рудного поля зафиксирована аномалия кажущейся поляризуемости интенсивностью до 7 %. Полные размеры контура не установлены, т.к. ее продолжение уходит на территорию населенного пункта.

На Аграфеновском участке в районе южной аномалии вызванной поляризации (до 5,5 %) скважины вскрыли толщу аргиллитов с подчиненными прослоями алевролитов и алевропесчаников, насыщенных в разной степени сульфидной минерализацией – от тонкой рассеянной вкрапленности до прожилков сплошных сульфидов, представленных в основном пиритом, реже – халькопиритом.

Таким образом, потенциально золотоносные минерализации сульфидно-прожилково-вкрапленного типа отображаются в аномалиях вызванной поляризации.

Заключение

Установлено, что основными тектоническими структурами, контролирующими размещение золотоносной прожилково-вкрапленной сульфидной минерализации, являются продольные разрывные нарушения. Они имеют широтное простирание и прослеживаются на расстояние до 1 км.

Областью локализации золотоносных минерализаций являются пакеты коротких поперечных разрывов северо-восточной ориентировки сбросо-сдвиговой природы, примыкающих к основному продольному разлому. В целом, пакеты поперечных нарушений представляют собой присдвиговые трансензионные структуры растяжения, благоприятные для локализации рудных минерализаций.

Золотоносными являются области развития кварц-анкерит-сульфидной прожилково-вкрапленной минерализации с максимальным развитием золото-арсенопирит-пиритовой ассоциации с тонкодисперсным золотом и поздних галенит-сфалеритовой и тетраэдритовой ассоциаций.

Площадь Барило-Крепинского рудного поля сложена немагнитными терригенными образованиями каменноугольного возраста, которым соответствует слабоконтрастное магнитное поле низкой интенсивности. Также каменноугольные образования характеризуются в целом относительно низким удельным электрическим сопротивлением.

Вкрапленная сульфидная минерализация проявляется аномалиями кажущейся поляризуемости относительно высокой интенсивности (4–7 %). При этом золотоносная прожилково-вкрапленная кварц-анкерит-сульфидная минерализация проявляется аномалиями кажущейся поляризуемости относительно низкой интенсивности (3–4 %).

Литература

1. Буряк В.А., Неменман И.С., Парада С.Г. Метаморфизм и оруденение углеродистых толщ Приамурья. Владивосток: Дальневосточное отделение Академии наук СССР, 1988. – 116 с.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 200 000. Изд. 2-е. Серия Донецкая. Лист L-37-V (г. Шахты) / Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. – 183 с.
3. Давыденко Д.Б. Возможности применения математического анализа космоснимков при прогнозировании месторождений золота на площадях Восточного Донбасса // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – № 3. – С. 23–37.
4. Давыденко Д.Б., Парада С.Г. Опыт разделения потенциальных полей Донбасса на фоновую, остаточную и локальную составляющие и некоторые результаты интерпретации // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 1. – С. 22–37. DOI: 10.46698/VNC.2021.23.67.003.
5. Зеленщиков Г.В., Курбанов Н.К., Кучеровский П.Г., Радаева Т.П. Перспективы золотоносности Припятско-Днепровско-Донецкого авлакогена // Руды и металлы. – 2001. – № 2. – С. 26–35.
6. Зеленщиков Г.В., Макарюха С.В., Радаева Т.П. Геологическое строение и рудоносность Черноречинского проявления золота в Восточном Донбассе / Проблемы геологии, геоэкологии и минерагении юга России и Кавказа. Т. 1. Новочеркасск: 2006. – С. 256–262.
7. Клещенков А.В., Зеленщиков Г.В. Опыт изучения газогеохимических эффектов от рудных залежей на примере Керчикского рудопоявления в Восточном Донбассе, Ростовская область // Руды и металлы. – 2012. – № 4. – С. 24–28.
8. Лихачев В.А., Зеленщиков Г.В. Минерально-сырьевая база Ростовской области // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Европейской территории России и Урала. Кн. 1. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. – С. 173–175.
9. Лихачев В.А., Зеленщиков Г.В., Терентенко Н.А. Новое рудопоявление цветных и благородных металлов в Восточном Донбассе // Сб. «Геология и полезные ископаемые Нижнего Дона», 1983. – С. 9–13.
10. Невалённый Ю.В. Ресурсы металлических полезных ископаемых // Проблемы и перспективы комплексного освоения минеральных ресурсов Восточного Донбасса. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2005. – С. 71–84.
11. Парада С.Г. Особенности локализации интрузивных пород и рудопоявлений Восточного Донбасса // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Т. XIII / Науч. ред. И.А. Керимов, В.А. Широкова, В.Б. Заалишвили, В.И. Черкашин. – М.: ИИЕТ РАН, 2023. – С. 141–148.
12. Frimmel H.E. Earth's continental crustal gold endowment // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2008. – Vol. 27. No. 1. – pp. 45–55.
13. Granovsky A.G. Magmatism and stages of the tectonic evolution in the Donets folded structure, Eastern Donets basin // *Geotectonics*. – 2018. – Vol. 52. No. 4. – pp. 485–498. DOI: 10.1134/S0016852118040039.
14. Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits // *Economic Geology*. – 2011. – Vol. 106. – pp. 331–358. DOI: 10.2113/econgeo.106.3.331.
15. Large R.R., Maslennikov V.V. Invisible gold paragenesis and geochemistry in pyrite from orogenic and sediment-hosted gold deposits // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10. No. 4. – pp. 339–352.
16. Saintot A., Stephenson R., Stovba S., Maistrenko Yu. Structures associated with inversion in the Donbass fold belt (Ukraine and Russia) // *Tectonophysics*. – 2003. – Vol. 373. – pp. 181–207. DOI: 10.1016/S0040-1951(03)00290-7.
17. Sylvester A.G. Strike-slip faults // *Bulletin of Geological Society of America*. – 1988. – Vol. 100. No. 11. – pp. 1666–1703.
18. Wang L., Qin K-Z., Song G-X., Li G-M. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification // *Ore Geology Reviews*. – 2019. – Vol. 107. – pp. 434–456.

References

1. Buryak V.A., Nemenman I.S., Parada S.G. Metamorphism and oxidation of carbonaceous strata in the Amur Region. Vladivostok. Far Eastern Branch of the Academy of Sciences of the USSR. 1988. 116 p. (In Russ.)
2. Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. 2nd ed. Donetsk Series. Sheet L-37-V (Shakhty). Explanatory Note. Saint Petersburg. VSEGEI. 2000. 183 p. (In Russ.)
3. Davydenko D.B. Possibilities of using mathematical analysis of space images at prediction of deposits of gold at the areas of Eastern Donbas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2016. No. 3. pp. 23–37. (In Russ.)
4. Davydenko D.B., Parada S.G. Experience of dividing potential fields of Donbass into background, residual and local components and some results of interpretation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 22–37. DOI: 10.46698/VNC.2021.23.67.003 (In Russ.)
5. Zelenschikov G.V., Kurbanov N.K., Kucherevsky P.G., Radaeva T.P. Gold potential of the Pripyat-Dnieper-Donetsk aulacogene. *Ores and Metals*. 2001. No. 2. pp. 26–35. (In Russ.)
6. Zelenschikov G.V., Makaryukha S.V., Radaeva T.P. Geological structure and ore potential of the Chernorechensky gold occurrence in the Eastern Donbass. In: *Problems of Geology, Geoecology, and Mineral Genesis in Southern Russia and the Caucasus*. Novocherkassk. 2006. Vol. 1. pp. 256–262. (In Russ.)
7. Kleshchenkov A.V., Zelenschikov G.V. A Study of the Gas Geochemical Effects of Ore Deposits: The Case of the Kertchik Ore Occurrence in the Eastern Donbass, Rostov Region. *Ores and Metals*. 2012. No. 4. pp. 24–28. (In Russ.)
8. Likhachev V.A., Zelenschikov G.V., Terentenkov N.A. A New ore deposit of nonferrous and precious metals in the Eastern Donbas. In: *Proceedings of the Conference “Geology and Mineral Resources of the Lower Don”*. 1983. pp. 9–13. (In Russ.)
9. Likhachev V.A., Zelenschikov G.V. Mineral resources of the Rostov Region. *Geology and Mineral Resources of the European Part of Russia and the Urals*. Vol. 1. Yekaterinburg. Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. pp. 173–175. (In Russ.)
10. Nevalyon Y.V. Metal mineral resources. In: *Problems and Prospects for the Integrated Development of Mineral Resources in the Eastern Donbass*. Rostov-on-Don. Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2005. pp. 71–84. (In Russ.)
11. Parada S.G. Characteristics of the Distribution of Intrusive Rocks and Ore Deposits in the Eastern Donbas. In: *Modern Problems of Geology, Geophysics, and Geoecology in the North Caucasus*. Vol. XV. Eds. I.A. Kerimov, V.A. Shirokova, V.B. Zaalishvili, V.I. Cherkashin. Moscow. IET RAS. pp. 141–148. (In Russ.)
12. Frimmel H.E. Earth’s continental crustal gold endowment. *Earth and Planetary Science Letters*. 2008. Vol. 267. No. 1. pp. 45–55.
13. Granovsky A.G. Magmatism and stages of the tectonic evolution in the Donets folded structure, Eastern Donets basin. *Geotectonics*. 2018. Vol. 52. No. 4. pp. 485–498. DOI: 10.1134/S0016852118040039.
14. Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. *Economic Geology*. 2011. Vol. 106. pp. 331–358. DOI: 10.2113/econgeo.106.3.331.
15. Large R.R., Maslennikov V.V. Invisible gold paragenesis and geochemistry in pyrite from orogenic and sediment-hosted gold deposits. *Minerals*. 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 339–352.
16. Saintot A., Stephenson R., Stovba S., Maistrenko Yu. Structures associated with inversion in the Donbass fold belt (Ukraine and Russia). *Tectonophysics*. 2003. Vol. 373. pp. 181–207. DOI: 10.1016/S0040-1951(03)00290-7.
17. Sylvester A.G. Strike-slip faults. *Bulletin of Geological Society of America*. 1988. Vol. 100. No. 11. pp. 1666–1703.
18. Wang L., Qin K.-Z., Song G.-X., Li G.-M. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. *Ore Geology Reviews*. 2019. Vol. 107. pp. 434–456.

УДК 622.691.2

DOI: 10.46698/VNC.2026.94.71.001

Оригинальная статья

Определение допустимого количества углекислого газа для размещения в геологической структуре

Э.Р. Гасумов^{1,2}, Р.А. Гасумов³

¹ Азербайджанский технический университет, Азербайджан, AZ1073, г. Баку,
пр. Г. Джавида, 25, e-mail: e.gasumov@gmail.com;

² Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
Азербайджан, AZ 1010, г. Баку, пр. Азадлыг, 34;

³ Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355017, г. Ставрополь,
ул. Пушкина, 1, e-mail: R.Gasumov@yandex.ru

Статья поступила: 13.02.2026, доработана: 22.05.2026, принята к публикации: 26.05.2026

Резюме: Актуальность работы. В статье рассмотрены результаты исследования по определению допустимого количества углекислого газа (CO_2) для размещения в геологической структуре – продуктивных пластах истощённых залежей углеводородного сырья, обеспечивающих надёжное хранение. Подземное размещение CO_2 признано ключевой технологией сокращения выбросов в атмосферу и является важной частью проектов по улавливанию и размещению диоксида углерода. Проекты по захоронению CO_2 в геологических структурах регулируются международными стандартами и российскими нормами, при этом к геологическим условиям и характеристикам вмещающих CO_2 резервуаров предъявляются особые требования по обеспечению долгосрочного безопасного хранения. Закачка в истощённые нефтяные и/или газовые пласты – после извлечения нефти и газа эти хорошо изученные резервуары представляют собой наилучшее решение для захоронения CO_2 . Изучение перспектив и рисков захоронения CO_2 в геологических структурах показывает, что геологические изменения (движения породы) могут вызвать миграцию CO_2 из формации в менее герметичные породы и далее на поверхность земли. В связи с этим определение допустимого количества CO_2 для размещения в геологической структуре является актуальной задачей.

Целью исследования является оценка пригодности геологических структур для захоронения CO_2 с учетом различных факторов, критериев и нормативных документов. **Материалы и методы.** Для определения допустимого количества CO_2 для размещения в геологической структуре используют теоретические методы, которые учитывают критерии выбора структуры, такие как количественная оценка потенциала хранения, расчёт необходимого объёма закачки CO_2 и оценка коэффициента растворения газа в пластовой воде. **Результаты исследований.** Предложен метод – уравнение для определения допустимого количества CO_2 для размещения в геологической структуре с учётом обеспечения его долгосрочного безопасного хранения. Выделены некоторые критерии, по которым оцениваются потенциальные геологические структуры для захоронения CO_2 с учётом изменения коэффициента сжимаемости углекислого газа.

Ключевые слова: углекислый газ, геологическая структура, критерии, коэффициент сжимаемости, хранение, CO_2 , метод оценки.

Для цитирования: Гасумов Э.Р., Гасумов Р.А. Определение допустимого количества углекислого газа для размещения в геологической структуре. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 132–144. DOI: 10.46698/VNC.2026.94.71.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.94.71.001

Original paper

Determination of the permissible amount of carbon dioxide for placement in a geological structure

E.R. Gasumov^{1,2}, R.A. Gasumov³

¹ Azerbaijan Technical University, 25 H. Javid Ave., Baku AZ1073, Azerbaijan,
e-mail: e.gasumov@gmail.com;

² Azerbaijan State Oil and Industry University, 34 Azadlig Ave., Baku AZ1010, Azerbaijan,
e-mail: e.gasumov@gmail.com;

³ North Caucasian Federal University, 1 Pushkina Str., Stavropol 355017,
Russian Federation, e-mail: R.Gasumov@yandex.ru

Received: 13.02.2026, revised: 22.05.2026, accepted: 26.05.2026

Abstract: Relevance. This article presents the results of a study assessing the capacity of geological structures for carbon dioxide (CO₂) storage. The target storage formations are the productive reservoirs of depleted hydrocarbon fields. The key objective of the study is to determine the maximum allowable volume of CO₂ that ensures secure and safe storage. The placement of CO₂ in geological structures is relevant given the trend toward low-carbon energy and the need to reduce greenhouse gas emissions. This issue is related to various aspects: legislative requirements, technology, research, and economics. Underground CO₂ placement is recognized as a key technology for reducing atmospheric emissions and is an important component of carbon dioxide capture and storage (CCS) projects. Carbon dioxide disposal projects in geological structures are regulated by international and Russian standards, with specific requirements for the geological conditions and characteristics of CO₂-containing reservoirs to ensure long-term safe storage. Injection into depleted oil and/or gas reservoirs—after oil and gas resources have been extracted, these well-studied reservoirs represent the best solution for CO₂ storage. Carbon dioxide can be stored in geological structures in gaseous, liquid, and supercritical states. The study of the prospects and risks of CO₂ storage in geological structures shows that geological changes (rock movements) can cause carbon dioxide migration from the formation to less sealed rocks and then to the Earth's surface. Therefore, determining the permissible amount of CO₂ for disposal in a geological structure is a pressing issue. **The aim of the study** is to assess the suitability of geological structures for carbon dioxide (CO₂) storage, taking into account various factors, criteria, and regulations. It also examines the criteria for selecting CO₂ storage sites, methods for assessing storage potential, the risks associated with gas placement, and methods for calculating the permissible amount of CO₂ for placement in a geological structure. **Materials and Methods.** To determine the permissible amount of CO₂ for placement in a geological structure, theoretical methods are used that take into account structure selection criteria, methods such as quantitative assessment of storage potential; calculation of the required volume of CO₂ injection; and assessment of the coefficient of gas dissolution in formation water. These methods allow for safe and long-term geological storage of CO₂, minimizing risks to the environment, natural resources, and human health. Theoretical-level materials are used, including regulatory documents, calculation methods, rock requirements, and monitoring information. **Results.** The method – equation is proposed for determining the permissible amount of carbon dioxide for disposal in a geological structure, taking into account the conditions for its long-term safe storage. Several criteria are identified for evaluating potential geological structures for CO₂ storage, taking into account changes in the compressibility coefficient of carbon dioxide.

Keywords: carbon dioxide, geological structure, criteria, compressibility coefficient, storage, CO₂, evaluation method.

For citation: Gasumov E.R., Gasumov R.A. Determination of the permissible amount of carbon dioxide for placement in a geological structure. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 132–144. DOI: 10.46698/VNC.2026.94.71.001

Введение

Согласно данным компьютерного моделирования климата увеличение выбросов парниковых газов (ПГ) приведёт к повышению уровня Мирового океана и повышению температуры воздуха. Их потенциальное воздействие на климат изучалось с помощью различных компьютерных симуляций: от простых одномерных моделей до сложных трёхмерных. Региональные модели общей циркуляции океана и атмосферы (GCM). Есть гипотеза о том, что значительно повышенный уровень атмосферного углекислого газа (диоксида углерода, CO_2) вызывает значительное глобальное потепление и связанные с ним последствия. Выделяются два аспекта последствий: реакция климата на повышение уровня концентрации CO_2 в атмосфере и реакция растений на повышение содержания CO_2 в воздухе [Архипов и др., 2023; Гасумов, Гасумов, 2025].

Анализ содержания CO_2 в атмосфере позволяет сделать вывод о том, что его увеличение в XX веке не оказало пагубного влияния на глобальный климат или температуру. Однако увеличение концентрации CO_2 постоянно сопровождается заметным увеличением темпов роста растений, свидетельством чего являются многочисленные лабораторные и полевые эксперименты, проведённые учёными из разных стран. Одним из путей минимизации негативного влияния CO_2 на окружающую среду является сокращение выбросов в атмосферу и их захоронение, в том числе в геологических структурах вглубь Земли [Masoud et al., 2024; Осипов и др., 2022].

При этом важно определить возможности залежи для размещения CO_2 и допустимое количество CO_2 с учётом обеспечения его долгосрочного безопасного хранения, что обуславливает необходимость учета вида и состояния геологических структур, методов оценки и нормативных документов, регламентирующих размещение CO_2 . Выделяются некоторые критерии, по которым оцениваются потенциальные геологические структуры для захоронения CO_2 [Аникеев, Аникеева, 2023; Дымочкина и др., 2022; Осипов и др., 2022]. Выделение критериев для оценки потенциальных геологических объектов для захоронения CO_2 является важным аспектом. После извлечения ресурсов нефти и газа истощённые пласты углеводородов (УВ) являются хорошо изученными резервуарами и представляют собой наилучшее решение для захоронения CO_2 путём его закачки в геологическую структуру. Изучение перспектив и рисков захоронения CO_2 в истощённых пластах УВ показывает, что геологические изменения (движения породы) могут вызвать миграцию углекислого газа (при его избыточном объёме, превышающем допустимый предел размещения) из формации в менее герметичные породы и далее на земную поверхность. Это определяет необходимость оценки допустимого количества CO_2 для размещения в геологической структуре.

Методы исследования

Для определения допустимого количества CO_2 при размещении в геологической структуре, используют теоретические методы, которые учитывают критерии выбора структуры, такие как количественная оценка потенциала хранения, расчёт необходимого объёма закачки CO_2 и оценка коэффициента растворения газа в пластовой воде, позволяющие обеспечить безопасное и длительное геологическое хранение CO_2 , минимизируя риски для окружающей среды, природных ресурсов и здоровья человека. Используются материалы теоретического уровня, которые включают нормативные документы, методы расчёта, требования к породам и информацию о результатах мониторинга.

Результаты работы и их обсуждение

Предложен метод – уравнение для определения допустимого количества углекислого газа при размещении в геологической структуре с учётом обеспечения его долгосрочного безопасного хранения. Выделены некоторые критерии, по которым

оцениваются потенциальные геологические структуры для захоронения CO_2 с учётом изменения коэффициента сжимаемости углекислого газа [Гасумов и др., 2024; Гасумов, Гасумов, 2025].

Изучены различные варианты размещения CO_2 в геологических структурах. При выборе геологических структур для размещения CO_2 учитывали, что потенциальные объекты должны соответствовать условиям долгосрочного удержания и невысвобождения закачанного газа, а также защищать минеральные ресурсы и пластовые воды от воздействия кислых компонентов [Переверзева и др., 2014; Masoud et al., 2024; Осипов и др., 2022]. При определении допустимого количества углекислого газа для размещения в геологической структуре должны быть учтены возможные риски для окружающей среды, природных ресурсов и здоровья человека [Корзун и др., 2023; Макашева, 2023; Раков, 2016; Da Costa et al., 2019; Daval et al., 2011; DeVries et al., 2005; Donadei, Schneider, 2022]. При исследовании допустимого количества CO_2 учитываются некоторые критерии (рис. 1) [Архипов и др., 2023].

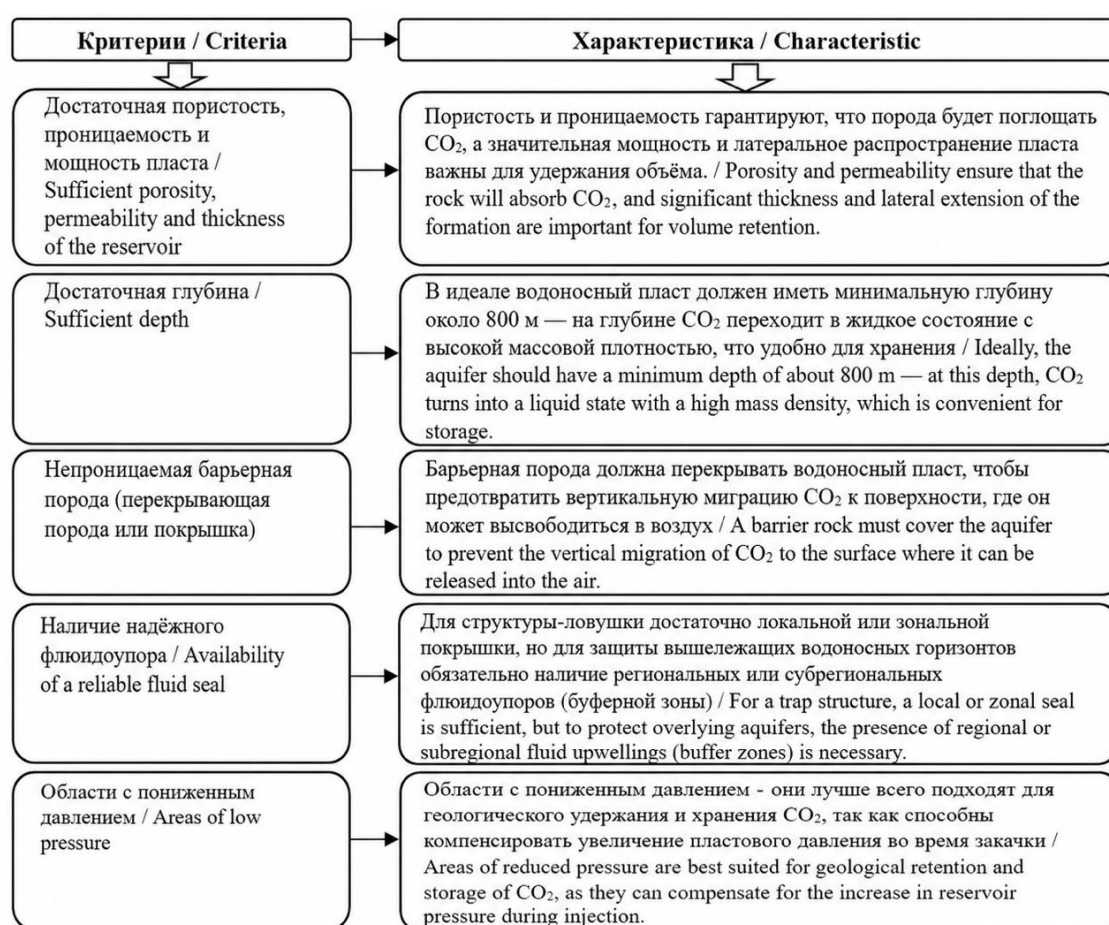
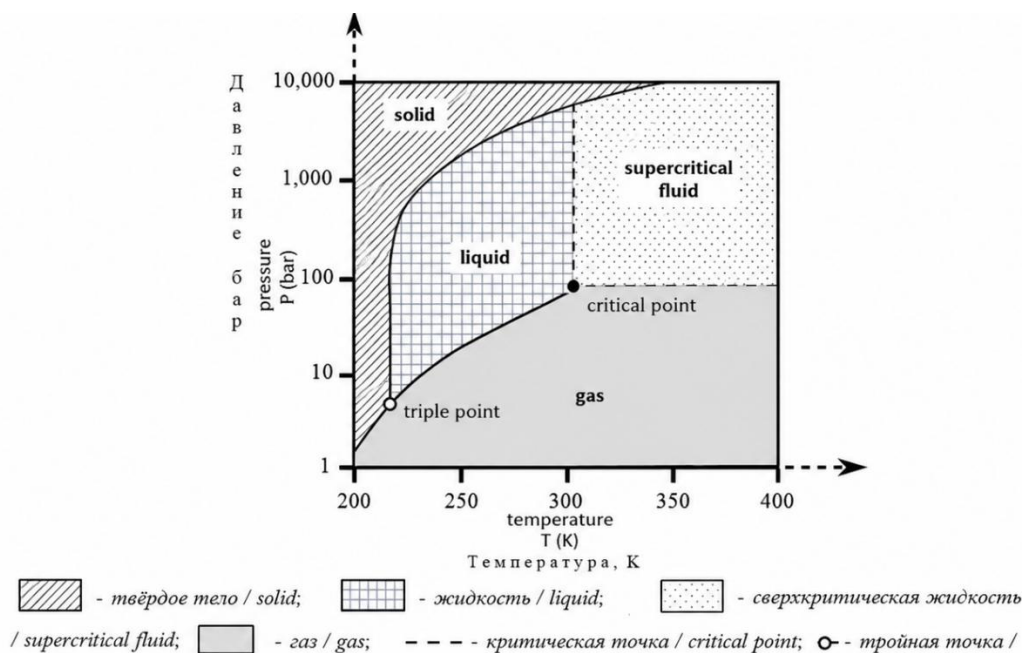


Рис. 1. Критерии, которые учитывают при исследовании допустимого количества углекислого газа /

Fig. 1. Criteria taken into account when studying the permissible amount of carbon dioxide

Для исследования используются различные методы оценки допустимого количества углекислого газа [Лапшин и др., 2011; Новиков и др., 2023; Гасумов, Гасумов, 2025].

На рисунках 2 и 3 показаны диаграмма фазового перехода и сопоставление молекулярной массы, критических параметров компонентов природного газа и CO_2 [Переверзева и др., 2014].



В области давлений ниже давления в тройной точке на диаграмме имеется только линия сублимации, то есть твёрдый и жидкий диоксид углерода сосуществовать не могут. Это объясняет, почему при атмосферном давлении сухой лёд (традиционное название твёрдого диоксида углерода CO_2). При атмосферном давлении и температуре выше $-78,5^\circ\text{C}$ ($194,65\text{ K}$) сублимируется, то есть переходит в углекислый газ, минуя жидкую фазу) не плавясь возгоняется и превращается сразу в углекислый газ /

At pressures below the triple point, the diagram shows only a sublimation line, meaning solid and liquid carbon cannot coexist.

This explains why, at atmospheric pressure, dry ice (the traditional name for solid carbon dioxide is CO_2).

At atmospheric pressure and temperatures above $-78,5^\circ\text{C}$ ($194,65\text{ K}$), it sublimates, that is, transforms into carbon dioxide, bypassing the liquid phase) without melting and transforms directly into carbon dioxide.

Рис. 2. Диаграмма фазового перехода углекислого газа (ru.wikipedia.org) /

Fig. 2. Phase transition diagram of carbon dioxide (ru.wikipedia.org)

Изменения физических свойств CO_2 в зависимости от давления и температуры (коэффициент сжимаемости, плотность, динамическая вязкость) рассчитаны по известной методике [Мосоров и др., 2024; Переверзева и др., 2014; Schussler, Kummel, 1989].

Расчёт количества углекислого газа, размещаемого в залежи для захоронения CO_2 в геологических резервуарах, включает учёт геологических параметров, свойств газа и условий залежи. Целью расчёта является определение того, сколько газа может вместить залежь, и вычисление объёма закачки. Оценочные расчёты по определению количества закачиваемого углекислого газа в пласт проводились с учётом изменения физических свойств CO_2 при постоянной пластовой температуре и достигаемом начальном пластовом давлении.

Фазовая диаграмма углекислого газа показывает зависимость физического состояния вещества от температуры и давления. На диаграмме представлены области, помеченные как твёрдое, жидкое и газообразное состояния, а также линии или кривые, разделяющие области [Мосоров и др., 2024] (рис. 2).

Некоторые особенности диаграммы:

- тройная точка указывает условия давления и температуры, при которых сосуществуют все три фазы;
- критическая точка указывает температуру и давление, выше которых существует одна фаза, чьи физические свойства являются промежуточными между газообразным и жидким состояниями;
- линия сублимации разделяет твёрдую и паровую фазы, обозначает температуры и давления, при которых фазы по обе стороны от кривой находятся в равновесии;

– кривая твёрдого тела показывает положительный уклон, что указывает на то, что температура плавления CO_2 увеличивается с давлением.

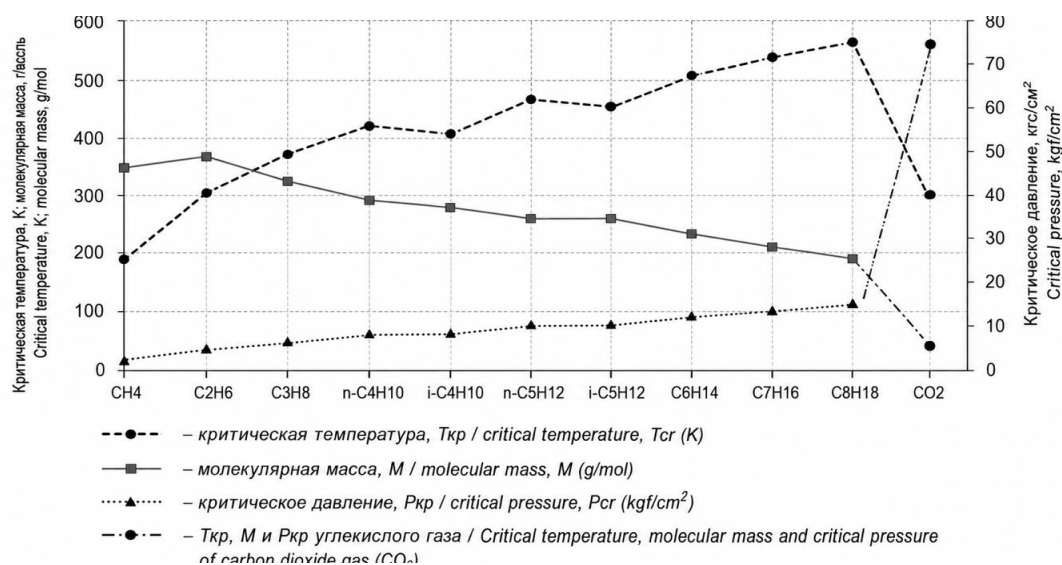


Рис. 3. Сопоставление молекулярной массы и критических параметров компонентов природного газа и углекислого газа /

Fig. 3. Comparison of molecular weight and critical parameters of natural gas and carbon dioxide components

Области на диаграмме представляют условия температуры и давления для одной фазы. Линии или кривые, разделяющие области, обозначают температуры и давления, при которых фазы по обе стороны от кривой находятся в равновесии. Точка при 1-й атмосфере и $-78,5^\circ\text{C}$ лежит на кривой, разделяющей твёрдую и паровую фазы, поэтому в этих условиях существует равновесие «твёрдое тело – пар» (на кривой испарения), а «твёрдое тело – жидкость» – на кривой плавления. В области давлений ниже давления в тройной точке на диаграмме имеется только линия сублимации, то есть твёрдый и жидкий CO_2 сосуществовать не могут. Это объясняет, почему при атмосферном давлении сухой лёд, не плавясь, возгоняется и превращается сразу в углекислый газ [Раков, 2016; Arany et al., 2025].

При повышенном давлении и обычных температурах углекислый газ переходит в жидкость (при 20°C и >6 МПа газ сгущается в бесцветную жидкость), а при -79°C твёрдый оксид углерода (IV) сублимируется – переходит из твёрдого состояния в газообразное, минуя жидкое.

В обычных условиях углекислый газ не образует кристаллы – температура и давление в обычной атмосфере не способствуют образованию кристаллических структур. Однако при очень низких температурах и очень высоких давлениях углекислый газ может образовывать кристаллы.

Молекулярная масса и критические параметры компонентов природного газа и углекислого газа отличаются (рис. 3). Критические параметры (давление, температура, плотность и другие) для компонентов природного газа определяются экспериментально [Мустафина, Сагидуллин, 2025]. Некоторые компоненты природного газа и их молекулярная масса: метан – 16,042 кг/кмоль; этан – 30,068 кг/кмоль; пропан – 44,094 кг/кмоль; изобутан – 58,120 кг/кмоль; н-бутан – 58,120 кг/кмоль; пентан – 72,146 кг/кмоль; азот – 28,016 кг/кмоль; кислород – 32,000 кг/кмоль; сероводород – 34,900 кг/кмоль.

Молекулярная масса углекислого газа (44,01 г/моль) меньше, чем молекулярная масса некоторых компонентов природного газа. При этом критические параметры

CO₂ (температура – 31 °С, давление – 7,38 МПа) отличаются: для углекислого газа критическая температура ниже, чем для некоторых компонентов природного газа.

В газообразном состоянии CO₂ ведёт себя как газ, коэффициент сжимаемости (Z) близок к единице. Газообразному состоянию соответствует широкий диапазон температур и давлений, не превышающий кривую кипения. При давлении 7,38 МПа и температуре 31 °С углекислый газ, имея плотность, близкую к плотности жидкости, ведёт себя как газоподобный сжимаемый флюид [Хан и др., 2016]. В сверхкритическом состоянии коэффициент сжимаемости находится между соответствующими значениями для газа и жидкости.

Отличие сжимаемости CO₂ от метана и азота при высоких температурах связано с тем, что углекислый газ может находиться в разных агрегатных состояниях, и его свойства зависят от температуры и давления, а также имеет особенности изменения коэффициента сжимаемости в зависимости от параметров [Современные проблемы ..., 2020]. Это необходимо учитывать, так как потребляемая мощность компрессоров, затрачиваемая на сжатие при транспортировке и нагнетании в пласт, зависит от степени сжимаемости газа.

Для количественных расчётов поведение реальных газов часто описывается уравнением Ван-дер-Ваальса, но для высоких плотностей и давлений параметры, рассчитанные по этому уравнению, часто расходятся с действительными (экспериментальными) значениями [Лапшин и др., 2011].

Проведённые расчёты показали, что коэффициент сжимаемости и плотность CO₂ изменяются в зависимости от термобарических параметров. Это связано с тем, что CO₂ может находиться в разных агрегатных состояниях, и его свойства зависят от температуры и давления [Современные проблемы ..., 2020; Хан и др., 2016] в интервале термобарических параметров: температура 250–450 К, давление 0–450 кгс/см² (рис. 4).

Изменение динамической вязкости углекислого газа в интервале термобарических параметров (температура 250–450 К, давление 0–450 кгс/см²) отражено на рисунке 4.

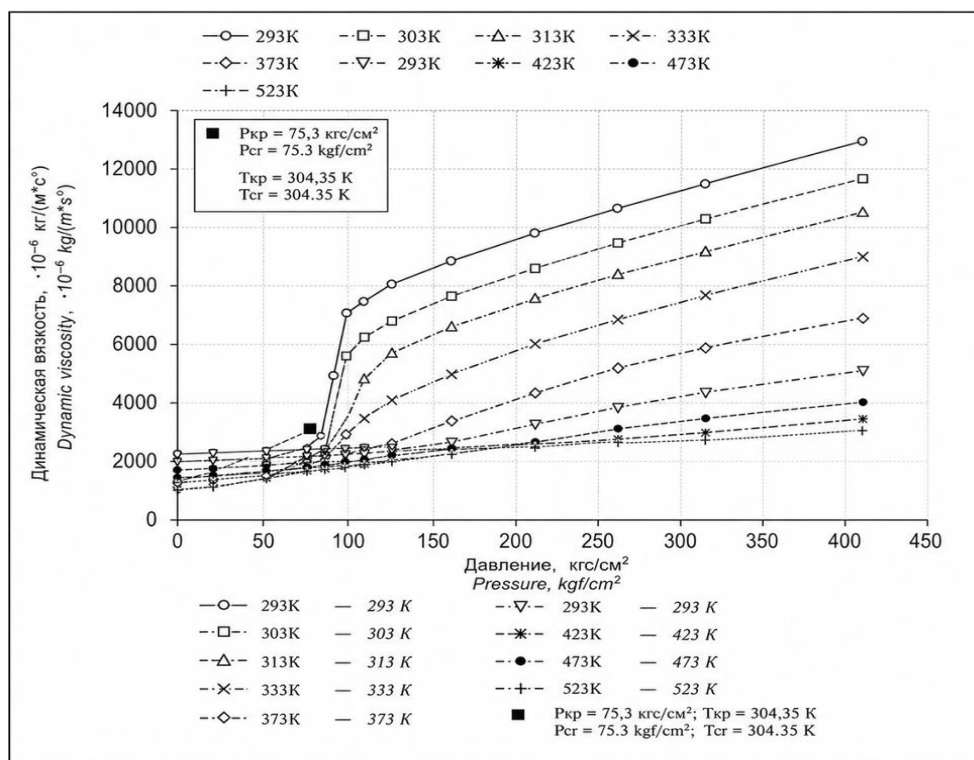


Рис. 4. Изменение динамической вязкости углекислого газа /

Fig. 4. Change in the dynamic viscosity of carbon dioxide

Изменение динамической вязкости CO_2 в интервале термобарических параметров позволяет определить его агрегатное состояние. Это связано с тем, что вязкость CO_2 зависит от температуры и давления, и в зависимости от условий газ может находиться в разных агрегатных состояниях: газообразном, жидком или сверхкритическом. В газообразном состоянии вязкость CO_2 порядка 10^{-5} Па·с, что соответствует широкому диапазону температур и давлений, не превышающему кривую кипения. В сверхкритическом состоянии CO_2 имеет вязкость порядка 10^{-5} – 10^{-4} Па·с (при температуре >31 °С и давлении $>7,38$ МПа).

Для расчёта количества углекислого газа (CO_2), размещённого в геологической структуре для геологического хранения, используют различные методы и учитывают определённые критерии.

Расчёт количества углекислого газа, размещаемого в залежи, проводится при следующих допущениях и принятых условиях:

1. Предельное значение средневзвешенного давления в залежи при размещении углекислого газа равно значению начального средневзвешенного пластового давления в залежи УВ [Кислицын, Кузнецов, 2022]:

$$P_n = P_{св}, \quad (1)$$

где: P_n – начальное средневзвешенное пластовое давление в залежи; $P_{св}$ – средневзвешенное давление в залежи после размещения углекислого газа.

Отсюда получается, что суммарная масса флюидов в залежи после размещения углекислого газа будет равна:

$$m_n = m_k, \quad (2)$$

где: m_n – масса УВ в залежи до начала разработки; m_k – масса флюидов в залежи после размещения углекислого газа.

2. В рамках вычислений не рассматривается распределение текущего давления на разные этапы эксплуатации; рассматривается непосредственно конечное состояние объекта после перераспределения флюидов в объекте ввиду разности молярных масс.

3. Для оценочных расчетов плотность УВ принимается как средняя величина за период разработки залежи.

Согласно принципу материального баланса, начальная масса газа в пласте равняется сумме отобранной к моменту времени t массы газа и оставшейся массы газа [Васильева, 2021; Рыбин, 2025; Soon et al., 1999; Siddiqui et al., 2010].

Уравнение материального баланса основано на законе сохранения массы газа. Извлечённый объём газа равен сумме изменений первоначального и привнесённого объёмов (в пласте, например) и учитывает динамику изменения запасов газа и приток жидкости из законтурной области; для газовой залежи записывается:

$$k_z V_{пор} P_n T_0 P_0 T_{пл} Z_n(P_n) = k_z V_{пор} P_m T_0 P_0 T_{пл} Z_n(P_n) + Q_{нак.г}, \quad (3)$$

где: k_z – коэффициент газонасыщения; $V_{пор}$ – поровый объём ловушки; P_n – начальное средневзвешенное пластовое давление в залежи; P_m – текущее средневзвешенное пластовое давление в залежи; P_0 – стандартное давление; $T_{пл}$ – пластовая температура; T_0 – стандартная температура; $Z_n(P_n)$ – коэффициент сверхсжимаемости пластового газа в начальных условиях; $Z_m(P_m)$ – коэффициент сверхсжимаемости пластового газа в текущих условиях; $Q_{нак.г}$ – накопленный отбор газа.

Величина $Q_{нак.г}$ является основной при расчёте размещаемого в залежи углекислого газа.

Газовая залежь, газовый режим

Уравнение равенства масс для газовой залежи в газовом режиме:

$$m_{г.д} + m_{г.ост} = m_{г.ост} + m_{CO_2}, \quad (4)$$

где: $m_{г.д}$ – масса добытого газа; $m_{г.ост}$ – масса остаточного газа в залежи на конец разработки; m_{CO_2} – масса углекислого газа, размещенного в залежи.

Из этого следует, что масса размещенного в залежи углекислого газа равна массе добытого из залежи газа. Поскольку масса равна произведению плотности газа на занятый им объём, то справедливо уравнение:

$$Q_{нак.г} \rho_{гн} = Q_{CO_2} \rho_{CO_{2н}}, \quad (5)$$

где: $Q_{нак.г}$ – накопленный отбор газа; $\rho_{гн}$ – плотность добываемого газа в нормальных условиях; Q_{CO_2} – запасы углекислого газа для размещения; $\rho_{CO_{2н}}$ – плотность углекислого газа в нормальных условиях.

Тогда расчёт запасов углекислого газа для размещения в залежи проводится по формуле:

$$Q_{CO_2} = Q_{нак.г} \rho_{гн} \rho_{CO_{2н}}. \quad (6)$$

Расчёт массы углекислого газа, размещаемого в залежи:

$$m_{CO_2} = Q_{нак.г} \rho_{гн} \quad (7)$$

Газоконденсатная залежь, газовый режим

Рассмотрим уравнение равенства масс для газоконденсатной залежи в газовом режиме:

$$m_{г.д} + m_{к.д} + m_{г.ост} + m_{к.ост} = m_{г.ост} + m_{к.ост} + m_{CO_2}, \quad (8)$$

где: $m_{к.д}$ – масса добытого конденсата; $m_{к.ост}$ – масса остаточного конденсата в залежи на конец разработки.

Из этого следует, что масса размещённого в залежи углекислого газа равна сумме масс, добытых из залежи газа и конденсата. Поскольку масса равна произведению плотности газа на занятый им объём, то справедливо уравнение:

$$Q_{нак.г} \rho_{гн} + m_{к.д} = Q_{CO_2} \rho_{CO_{2н}}. \quad (9)$$

Тогда расчёт запасов углекислого газа для размещения проводится по формуле:

$$Q_{CO_2} = m_{к.д} + Q_{нак.г} \rho_{гн} \rho_{CO_{2н}}. \quad (10)$$

Расчёт массы углекислого газа, размещаемого в залежи:

$$m_{CO_2} = m_{к.д} + Q_{нак.г} \rho_{гн}. \quad (11)$$

Определение допустимого количества CO_2 для размещения в геологической структуре – продуктивных пластах истощённых залежей УВ – помогает обеспечить безопасное и долгосрочное хранение CO_2 .

Заключение

Предложены подходы для определения допустимого количества углекислого газа для размещения в геологических структурах с учётом обеспечения его долгосрочного безопасного хранения. Выделены некоторые критерии, по которым оцениваются потенциальные геологические структуры для захоронения CO_2 с учётом изменения коэффициента сжимаемости углекислого газа.

Определение допустимого количества CO_2 учитывает критерии выбора геологических структур для размещения, методы оценки и нормативные документы, регламентирующие размещение углекислого газа в геологических структурах.

Оценочные расчёты по определению количества закачиваемого в пласт углекислого газа проводились с учётом изменения физических свойств CO_2 при постоянной пластовой температуре и достигаемом начальном пластовом давлении. Предложена фазовая диаграмма углекислого газа, показывающая зависимость физического состояния вещества от температуры и давления, а также уравнение материального баланса для газовой залежи.

Установлено, что масса (произведение плотности газа на занятый объём) CO_2 , размещённого в истощённых залежах УВ, разработанных в газовом режиме, соответствует объёму извлечённого из них природного газа.

Определение допустимого количества CO_2 для размещения в продуктивных пластах истощённых залежей УВ важно для проектов по улавливанию и размещению диоксида углерода (CCS) – технологии сокращения выбросов CO_2 в атмосферу.

Литература

1. Аникеев Д.П., Аникеева Э.С. Оценка различных доступных опций в пакетах гидродинамического моделирования для моделирования захоронения углекислого газа в геологические структуры различных типов // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2023. – Вып. 2(41). – С. 108–123. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2023-41.art7.
2. Архипов В.Н., Яценко С.А., Анкудинов А.А., Молчанова А.А., Смирнова Е.В. Технология CCS: от теории к практике // Экспозиция. Нефть. Газ. – 2023. – № 8. – С. 107–110. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-8-107-110.
3. Васильева Д.А. Применение метода материального баланса для оценки снижения запасов газа // Молодой учёный. – 2021. – № 24(366). – С. 39–42.
4. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Оценка воздействия подземного размещения жидких отходов на геологическую среду (на примере истощённых газовых месторождений) // Юг России: экология, развитие. – 2025. – Т. 20. № 1. – С. 145–159. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-1-13.
5. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р., Валиев В.М., Мусаева Ф. Геологические и технико-экономические аспекты проектирования подземных хранилищ газа в пластах-коллекторах // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 152–165. DOI: 10.46698/VNC.2024.24.13.013.
6. Дымочкина М.Г., Самодуров М.С., Павлов В.А., Пенигин А.В., Ушмаев О.С. Геологический потенциал улавливания и хранения диоксида углерода в Российской Федерации // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 12. – С. 20–23. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-12-20-23.
7. Кислицын А.А., Кузнецов С.В. Оценка дренируемых запасов газа методом материального баланса // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2022. – № 6. – С. 56–72. DOI: 10.31660/0445-0108-2022-6-56-72.
8. Корзун А.В., Ступакова А.В., Харитонов Н.А., Асеева А.В., Осипов К.О., Пронина Н.В. и др. Применимость природных геологических объектов для хранения, захоронения и утилизации углекислого газа (обзор) // Георесурсы. – 2023. – № 25(2). – С. 22–35. DOI: 10.18599/grs.2023.2.2.
9. Лапшин В.И., Волков А.Н., Шафиев И.М. Коэффициент сжимаемости газов и газоконденсатных смесей: экспериментальное определение и расчёты // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». – 2011. – № 1(6). – С. 120–131.

10. Макашева К.Н. Глобальные климатические изменения и экологическая безопасность: сравнительно-правовой анализ опыта России и Казахстана // Актуальные проблемы российского права. – 2023. – Т. 18. № 12. – С. 178–186. DOI: 10.17803/1994-1471.2023.157.12.178-186.
11. Мосоров В.И., Тамилов М.Ю., Мотошкин П.В. Криогенная обработка нержавеющей стали // Образование и наука. – 2024. – С. 44–52.
12. Мустафина К.А., Сагидуллин А.К. Влияние гидрокарбоната натрия на образование и роста газового гидрата углекислого газа // Сборник научных трудов. Часть 2. Наука. Технологии. Инновации. Новосибирск: НГТУ, 2025. – С. 66–69.
13. Новиков Д.А., Фомина Я.В., Юрчик И.И. и др. Оптимальный комплекс критериев зонального прогноза перспектив захоронения углекислого газа в геологических формациях // Экология и промышленность России. – 2023. – Т. 27. № 4. – С. 44–49. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-4-44-49.
14. Осипов А.В., Мустаев Р.Н., Монакова А.С., Бондарева Л.И., Данцова К.И. Механизмы и варианты утилизации и захоронения углекислого газа в недрах // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2022. – № 4. – С. 40–53. DOI: 10.32454/0016-7762-2022-64-4-40-53.
15. Переверзева С.А., Коносавский П.К., Тудвачев А.В., Хархордин И.Л. Захоронение промышленных выбросов углекислого газа в геологические структуры // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 2014. – № 1. – С. 5–21.
16. Раков Э.Г. Углерода диоксид // Большая российская энциклопедия. М.: Большая российская энциклопедия. – 2016. – Т. 32. – С. 662–663.
17. Рыбин И.В. Ресурсы метана в подработанном массиве – как опасное может стать полезным // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 2. – С. 196–205. DOI: 10.46698/VNC.2025.99.81.001.
18. Современные проблемы и перспективные направления инновационного развития науки. // Сборник материалов международной научно-практической конференции. Т. 2. М.: Международная корпорация научных исследований и разработок, 2020. – 84 с.
19. Хан С.А., Дорохин В.Г., Бондаренко Н.П. Использование особенностей агрегатных состояний двуокиси углерода для замещения части буферного объема подземных хранилищ газа // Газовая промышленность. – 2016. – № 4. – С. 50–54.
20. Arany D., Kurucz N., Korosi M. Phase behavior of potential drug delivery systems, polycaprolactone nonsteroidal anti-inflammatory drug in a pressurized carbon dioxide medium // ACS Omega. – 2025. – No. 10(51). – pp. 62657–62666.
21. Da Costa A.M., Da Costa P.V.M., Udebhulu O.D. et al. Potential of storing gas with high CO₂ content in salt caverns built in ultra-deep water in Brazil // Greenhouse Gases: Science and Technology. – 2019. – Vol. 9. Issue 1. – pp. 79–94. DOI: 10.1002/ghg.1834.
22. Daval D., Sissmann O., Menguy N. et al. Influence of amorphous silica layer formation on the dissolution rate of olivine at 90°C and elevated pCO₂ // Chemical Geology. – 2011. – Vol. 284(1–2). – pp. 193–209. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2011.02.021.
23. DeVries K.L., Mellegard K.D., Callahan G.D., Goodman W.M. Cavern roof stability for natural gas storage in bedded salt. Final Report. Rapid City: RESPEC, 2005. – 191 p.
24. Donadei S., Schneider G.S. Compressed air energy storage // Storing Energy. – 2022. – pp. 141–156. DOI: 10.1016/B978-0-12-824510-1.00034-9.
25. Masoud R., Ilyushin P.Y., Baldina T.R. et al. Analysis of the assessment of the prospects for the burial of CO₂ in unexplored aquifer complexes on the example of a facility in the Perm Region // Journal of Mining Institute. – 2024. – Vol. 270. – pp. 931–940.
26. Schussler U., Kummel R. Carbon dioxide removal from fossil fuel power plants by refrigeration under pressure // In: Proceedings of the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Washington: IEEE, – 1989. DOI: 10.1109/IECEC.1989.74714.
27. Siddiqui F., Waqas G.M., Noma M. Application of general material balance on gas condensate reservoirs GIIP estimation // In: SPE/PAPG Annual Technical Conference. Islamabad, Pakistan. 2010. pp. 120–131.
28. Soon W., Baliunas S.L., Robinson A.B., Robinson Z.W. Environmental effects of increased atmospheric carbon dioxide // Energy and Environment. – 1999. – Vol. 13(5). – pp. 149–164. DOI: 10.1260/0958305991499694.

References

1. Anikeev D.P., Anikeeva E.S. Evaluation of various available options in hydrodynamic modeling packages for modeling the underground storage for carbon dioxide in geological structures of various types. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2023. Issue 2(41). pp. 108–123. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2023-41.art7. (In Russ.)
2. Arkhipov V.N., Yashchenko S.A., Ankudinov A.A., Molchanova A.A., Smirnova E.V. CCS Technologies: from theory to practice. *Exposition Oil Gas*. 2023. No. 8. pp. 107–110. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-8-107-110. (In Russ.)
3. Vasilyeva D.A. Application of the material balance method to assess the decline of gas reserves. *Young Scientist*. 2021. No. 24(366). pp. 39–42. (In Russ.)
4. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Assessment of the impact of underground disposal of liquid waste on a geological environment (using the example of depleted gas fields). *South of Russia: Ecology, Development*. 2025. Vol. 20. No. 1. pp. 145–159. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-1-13. (In Russ.)
5. Gasumov R.A., Gasumov E.R., Veliyev V.M., Musayeva F. Geological and technical-economic issues of designing underground gas storage facilities in reservoir formations. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 152–165. DOI: 10.46698/VNC.2024.24.13.013. (In Russ.)
6. Dymochkina M.G., Samodurov M.S., Pavlov V.A., Penigin A.V., Ushmaev O.S. Geological potential for carbon dioxide capture and storage of the Russian Federation. *Oil Industry*. 2022. No. 12. pp. 20–23. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-12-20-23. (In Russ.)
7. Kislitsyn A.A., Kuznetsov S.V. Assessment of drainable gas reserves using the material balance method. *News of Higher Educational Institutions. Oil and Gas*. 2022. No. 6. pp. 56–72. DOI: 10.31660/0445-0108-2022-6-56-72. (In Russ.)
8. Korzun A.V., Stoupakova A.V., Kharitonova N.A., Aseeva A.V., Osipov K.O., Pronina N.V. et al. Applicability of natural geological objects for storage, disposal and utilization of carbon dioxide (review). *Georesources*. 2023. No. 25(2). pp. 22–35. DOI: 10.18599/grs.2023.2.2. (In Russ.)
9. Lapshin V.I., Volkov A.N., Shafiev I.M. Compressibility coefficient of gases and gas condensate mixtures: experimental determination and calculations. *Nauchno-tehnicheskij Sbornik. Vesti Gazovoy Nauki*. 2011. No. 1(6). pp. 120–131. (In Russ.)
10. Makasheva K.N. Global climate change and environmental safety: comparative legal analysis of the experience of Russia and Kazakhstan. *Actual Problems of Russian Law*. 2023. Vol. 18. No. 12. pp. 178–186. DOI: 10.17803/1994-1471.2023.157.12.178-186. (In Russ.)
11. Mosorov V.I., Tamirov M.Yu., Motoshkin P.V. Cryogenic treatment of stainless steels. *Education and Science*. 2024 pp. 44–52. (In Russ.)
12. Mustafina K.A., Sagidullin A.K. Influence of sodium hydrocarbonate on the formation and growth of carbon dioxide gas hydrate. In: *Collection of Scientific Papers. Part 2. Science. Technologies. Innovations*. Novosibirsk. NSTU. 2025. pp. 66–69. (In Russ.)
13. Novikov D.A., Fomina Ya.V., Yurchik I.I. et al. Optimal set of criteria for the zonal forecast of the potential for carbon dioxide capture and storage in geological formations. *Ecology and Industry of Russia*. 2023. Vol. 27. No. 4. pp. 44–49. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-4-44-49. (In Russ.)
14. Osipov A.V., Mustaev R.N., Monakova A.S., Bondareva L.I., Dantsova K.I. Mechanisms and options for the utilization and burial of carbon dioxide in the earth interior. *Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration*. 2022. No. 4. pp. 40–53. DOI: 10.32454/0016-7762-2022-64-4-40-53. (In Russ.)
15. Pereverzeva S.A., Konosavskiy P.K., Tudvachev A.V., Kharkhordin I.L. Disposal of carbon dioxide industrial emissions in geological structures. *Vestnik of Saint Petersburg University Series 7. Geology. Geography*. 2014. No. 1. pp. 5–21. (In Russ.)
16. Rakov E.G. Carbon dioxide. *The Great Russian Encyclopedia*. Moscow. The Great Russian Encyclopedia. 2016. Vol. 32. pp. 662–663. (In Russ.)
17. Rybin I.V. Methane resources in the undermined strata: from hazard to valuable resource. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 2. pp. 196–205. DOI: 10.46698/VNC.2025.99.81.001. (In Russ.)

18. Modern problems and promising directions of innovative development of science. In: Collection of materials of the international scientific and practical conference. Vol. 2. Moscow. International Corporation for Scientific Research and Development. 2020. 84 p. (In Russ.)
19. Khan S.A., Dorokhin V.G., Bondarenko N.P. How carbon dioxide aggregate state aspects serve to partially replace gas storage buffer volume. *Gas Industry*. 2016. No. 4. pp. 50–54. (In Russ.)
20. Arany D., Kurucz N., Korosi M. Phase behavior of potential drug delivery systems, polycaprolactone nonsteroidal anti-inflammatory drug in a pressurized carbon dioxide medium. *ACS Omega*. 2025. No. 10(51). pp. 62657–62666.
21. Da Costa A.M., Da Costa P.V.M., Udebhulu O.D. et al. Potential of storing gas with high CO₂ content in salt caverns built in ultra-deep water in Brazil. *Greenhouse Gases: Science and Technology*. 2019. Vol. 9. Issue 1. pp. 79–94. DOI: 10.1002/ghg.1834.
22. Daval D., Sissmann O., Menguy N. et al. Influence of amorphous silica layer formation on the dissolution rate of olivine at 90°C and elevated pCO₂. *Chemical Geology*. 2011. Vol. 284(1–2). pp. 193–209. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2011.02.021.
23. DeVries K.L., Mellegard K.D., Callahan G.D., Goodman W.M. Cavern roof stability for natural gas storage in bedded salt. Final Report. Rapid City. RESPEC. 2005. 191 p.
24. Donadei S., Schneider G.S. Compressed air energy storage. *Storing Energy*. 2022. pp. 141–156. DOI: 10.1016/B978-0-12-824510-1.00034-9.
25. Masoud R., Ilyushin P.Y., Baldina T.R. et al. Analysis of the assessment of the prospects for the burial of CO₂ in unexplored aquifer complexes on the example of a facility in the Perm Region. *Journal of Mining Institute*. 2024. Vol. 270. pp. 931–940.
26. Schussler U., Kummel R. Carbon dioxide removal from fossil fuel power plants by refrigeration under pressure. In: *Proceedings of the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*. Washington. IEEE. 1989. DOI: 10.1109/IECEC.1989.74714.
27. Siddiqui F., Waqas G.M., Noma M. Application of general material balance on gas condensate reservoirs GIP estimation. In: *SPE/PAPG Annual Technical Conference*. Islamabad, Pakistan. 2010. pp. 120–131.
28. Soon W., Baliunas S.L., Robinson A.B., Robinson Z.W. Environmental effects of increased atmospheric carbon dioxide. *Energy and Environment*. 1999. Vol. 13(5). pp. 149–164. DOI: 10.1260/0958305991499694.

УДК 556.314:553.98 (574.1)

DOI: 10.46698/VNC.2026.80.72.001

Оригинальная статья

Подземная гидросфера нефтегазоносных осадочных бассейнов

В.В. Ларичев^{ORCID}, В.И. Попков^{ORCID}, И.В. Попков^{ORCID}

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

Статья поступила: 16.03.2026, доработана: 20.05.2026, принята к публикации: 25.05.2026

Резюме: Актуальность работы. Большинство нефтегазоносных осадочных бассейнов в гидрогеологическом отношении представляют собой сложные природные водонапорные системы различных генетических типов. Наблюдаемая вертикальная зональность этих систем теснейшим образом связана с геологическим строением бассейнов и историей их развития. В представленной работе на примере Южно-Мангышлакского нефтегазоносного осадочного бассейна приведены сведения о вертикальной гидрогеологической зональности подземной гидросферы и ее взаимосвязях с процессами генерации, миграции и аккумуляции нефти и газа. **Целью исследований** является изучение гидрогеологической зональности осадочных бассейнов в связи с особенностями локализации скоплений углеводородов в их разрезе. **Методы исследования.** Основу работы составляет обширная база исходных данных, содержащая результаты опробования и химических анализов сотен гидрогеологических скважин; более 600 разведочных, поисковых и поисково-оценочных скважин на месторождениях и структурах Южного Мангышлака. Привлечены данные химических анализов макро- и микрокомпонентного состава пластовых флюидов, их изотопии, содержания в водах щелочных и щелочноземельных металлов. Учтены результаты геолого-гидродинамического моделирования месторождений углеводородов, материалы по подсчету запасов нефти и газа. Исследованы емкостно-фильтрационные свойства пород. Важную информацию о фильтрационных свойствах пород, их латеральной флюидопроводимости содержат результаты специальных гидродинамических и трассерных исследований, проведенных на месторождениях углеводородов. **Результаты работы.** В результате выполненного анализа в подземной гидросфере нефтегазоносных осадочных бассейнов выделены следующие гидрогеологические системы: 1) термогидратационная система перегретых вод, суб- и надкритических газовых смесей и флюидов; 2) гидрогеологическая система высоконапорных элизионных вод; 3) гидрогеологическая водонапорная система артезианских вод; 4) гидрогеологическая система грунтовых вод неоген-четвертичных отложений. Гидрогеологические условия различных систем определяются характером флюидопроводимости разреза при преобладающей роли вертикальной составляющей, связанной с вторжением в верхние горизонты земной коры высокоэнергетичных глубинных флюидов. Гидрогеологическая зональность недр осадочного бассейна находится в тесной взаимосвязи с зональностью процессов генерации, миграции и аккумуляции нефти и газа: термогидратационная система идентифицируется с зоной их вероятной генерации, элизионная – с зоной аккумуляции и консервации, а инфильтрационная – с аконсервационной зоной. Установленные закономерности могут быть перенесены и на другие нефтегазоносные осадочные бассейны, в частности, Восточного и Западного Предкавказья, где можно проследить аналогичные черты в строении подземной гидросферы с соответствующей корректировкой стратиграфической привязки гидрогеологических систем.

Ключевые слова: подземная гидросфера, осадочный бассейн, глубинные флюиды, гидрогеологические и нефтегазоносные системы.

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-27-00037.

Для цитирования: Ларичев В.В., Попков В.И., Попков И.В. Подземная гидросфера нефтегазоносных осадочных бассейнов. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 145–159. DOI: 10.46698/VNC.2026.80.72.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.80.72.001

Original paper

Underground hydrosphere of oil-and-gas-rich sedimentary basins

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

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

Received: 16.03.2026, revised: 20.05.2026, accepted: 25.05.2026

Abstract: Relevance. Most oil-and-gas-bearing sedimentary basins are complex natural water-pressure systems of various genetic types in terms of hydrogeology. The observed vertical zoning of these systems is closely related to the geological structure of the basins and their development history. This paper provides information about the vertical hydrogeological zoning of the underground hydrosphere and its relationship to the processes of oil and gas generation, migration, and accumulation, using the example of the South Mangyshlak oil-and-gas-bearing sedimentary basin. **Aim.** The study of the hydrogeological zoning of sedimentary basins is related to the localization of hydrocarbon accumulations in their sections. **Methods.** The work is based on an extensive database of initial data, which contains the results of testing and chemical analyses of hundreds of hydrogeological wells; more than 600 exploration, prospecting, and evaluation wells in the fields and structures of the Southern Mangyshlak. The data of chemical analyses of the macro- and micro-component composition of reservoir fluids, their isotopy, and the content of alkaline and alkaline-earth metals in the waters are also used. The results of geological and hydrodynamic modeling of hydrocarbon fields, as well as materials on the calculation of oil and gas reserves, have been taken into account. The reservoir properties of the rocks have been studied. The results of special hydrodynamic and tracer studies conducted at hydrocarbon fields provide important information about the reservoir properties of the rocks and their lateral fluid conductivity. **Results.** As a result of the analysis performed, the following hydrogeological systems were identified in the underground hydrosphere of oil-and-gas-bearing sedimentary basins: 1) the thermohydration system of superheated waters, sub- and supercritical gas mixtures, and fluids; 2) the hydrogeological system of high-pressure elision waters; 3) the hydrogeological water-pressure system of artesian waters; 4) the hydrogeological system of groundwater in Neogene-Quaternary deposits. The hydrogeological conditions of various systems are determined by the nature of the fluid conductivity of the section, with a predominant role of the vertical component associated with the intrusion of high-energy deep fluids into the upper layers of the earth's crust. The hydrogeological zoning of the subsurface of the sedimentary basin is closely related to the zoning of the processes of oil and gas generation, migration, and accumulation: the thermohydration system is identified with the zone of probable generation, the elision system with the zone of accumulation and conservation, and the infiltration system with the zone of non-preservation. The established patterns can be transferred to other oil-and-gas-bearing sedimentary basins, particularly those of the Eastern and Western Ciscaucasia, where similar features in the structure of the underground hydrosphere can be observed with appropriate adjustments to the stratigraphic correlation of hydrogeological systems.

Keywords: underground hydrosphere, sedimentary basin, deep fluids, hydrogeological and oil-and-gas systems.

Acknowledgments: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation, project No. 23-27-00037.

For citation: Larichev V.V., Popkov V.I., Popkov I.V. Underground hydrosphere of oil-and-gas-rich sedimentary basins. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 145–159. DOI: 10.46698/VNC.2026.80.72.001

Введение

Во всех известных моделях нефтегазообразования и нефтегазонакопления в земной коре важное значение отводится гидрогеологическому фактору [Вассоевич, 1976; Гуревич и др., 1972; Капченко, 1982; Колодий, 1982; Boullier, 1999; Garven, 1989; Zhao, Al-Aasm, 2012 и др.]. Гидрогеологические системы осадочных бассейнов эволюционируют на всем протяжении их истории геологического развития, в то время как нефтегазоносные включаются в этот процесс лишь с момента появления углеводородов (УВ) в бассейне. Окончательная стратификация водонапорных систем, наблюдаемая в настоящее время, формируется на последнем (новейшем) этапе тектогенеза. В результате вчерашние элизионные системы, вышедшие из-под уровня моря, подвергаются активной интервенции инфильтрационных вод. Этот процесс на современном этапе охватывает первые от поверхности водоносные горизонты и комплексы, а также прибортовые, наиболее приподнятые части нефтегазоносных осадочных бассейнов (НГБ). Следовательно, для одного и того же водоносного комплекса в пределах НГБ могут быть характерны черты как инфильтрационного (на участках раскрытого залегания водовмещающих пород), так и элизионного, в более погруженных зонах, режимов.

В то же время породы, залегающие на больших глубинах, в результате значительных катагенетических преобразований, практически утратили свои первоначальные емкостно-фильтрационные свойства, в результате чего для глубокопогруженных горизонтов осадочных бассейнов характерен стагнационный гидродинамический режим [Абукова, Волож, 2021; Дюнин, 2000; Капченко, 1982; Попков и др., 2023; Лукин, 2005; Lichtner, 1988; Jiang et al., 2011; Person et al., 2012; Toth, 2009]. Распространение участков развития вторичных коллекторов носит островной мозаичный характер [Дюнин, 2000; Попков и др., 2023; Cox, 1995; Lichtner et al., 1996; Nguyen et al., 1988; Nur, Walder, 1990; Pang et al., 2020], которые, по сути, контролируют также и масштабы латеральной миграции флюидов. Время формирования участков дилатансии горных пород приходится на заключительный этап тектонического развития региона.

Очевидно, что гидрогеологические особенности осадочных бассейнов находятся в тесной взаимосвязи с процессами онтогенеза УВ, определяя закономерности локализации их скоплений в разрезе. Данную проблему предлагается рассмотреть на примере хорошо изученного Южно-Мангышлакского артезианского бассейна, входящего в состав Предкавказско-Южномангышлакской нефтегазоносной провинции.

Материалы и методы исследований

В представленной статье синтезированы результаты многолетних исследований авторов по изучению подземной гидросферы НГБ Скифско-Туранской плиты, ее места в процессах формирования скоплений УВ в осадочном чехле и фундаменте молодой платформы. Основу работы составляет обширная база исходных данных, содержащая результаты опробования и химических анализов сотен гидрогеологических скважин; более 600 разведочных, поисковых и поисково-оценочных скважин на месторождениях и структурах Южного Мангышлака. Привлечены данные химических анализов макро- и микрокомпонентного состава пластовых флюидов, их изотопии, содержаний в водах щелочных и щелочноземельных металлов. Учтены результаты геолого-гидродинамического моделирования месторождений УВ, материалы по подсчету запасов нефти и газа. Исследованы емкостно-фильтрационные свойства пород. Важную информацию о фильтрационных свойствах пород, их латеральной флюидопроводимости, особенно доюрской части разреза (пермско-триасовый доплитный комплекс, палеозойский фундамент), содержат результаты специальных гидродинамических и трассерных исследований, проведенных на месторождениях УВ.

Краткие сведения о геологическом строении района исследований

В строении разреза земной коры Южно-Мангышлакского НГБ (рис. 1), располагающегося в западной части Туранской плиты, выделяется три структурно-вещественных комплекса: 1) палеозойский складчатый фундамент, 2) пермско-триасовый промежуточный комплекс и 3) юрско-неогеновый платформенный чехол.

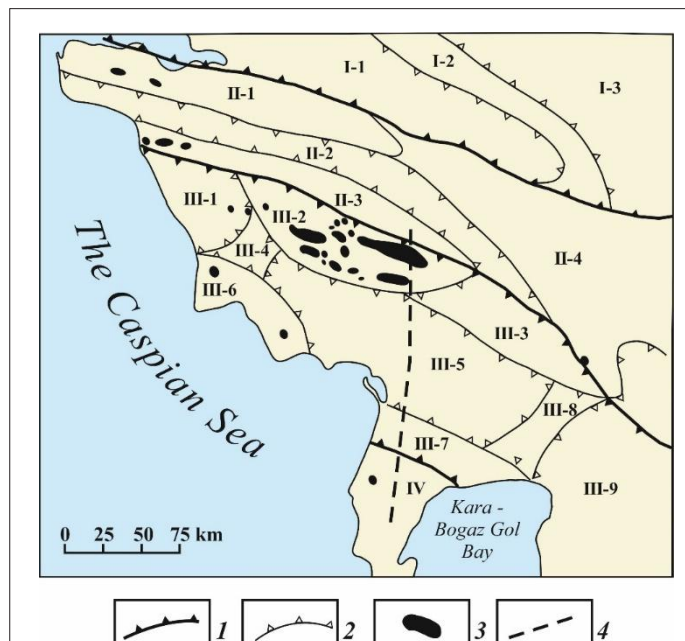


Рис. 1. Тектоническая схема платформенного чехла Южно-Мангышлакского НГБ. Границы тектонических элементов: 1 – первого порядка; 2 – второго порядка; 3 – основные месторождения нефти и газа; 4 – местоположение разреза, приведенного на рис. 2.

I – Северо-Устьюртская синеклиза: I₁ – Южно-Бузачинский прогиб, I₂ – Кырынско-Токубайский вал, I₃ – Арыстановская ступень; II – Мангышлакская система дислокаций: II₁ – Каратаусский вал, II₂ – Чакырганский прогиб, II₃ – Беке-Башкудукский вал, II₄ – Восточно-Мангышлакские дислокации; III – Южно-Мангышлакский прогиб: III₁ – Сегендыкская депрессия, III₂ – Жетыбай-Узенская ступень, III₃ – Кокумбайская моноκлиналь, III₄ – Карагиинская седловина, III₅ – Жазгурлинская депрессия, III₆ – Песчаномысско-Ракушечная зона поднятий, III₇ – Аксу-Кендырлинская ступень, III₈ – Карынжарыкская седловина, III₉ – Учкудукская депрессия; IV – Карабогазский свод /

Fig. 1. Tectonic scheme of the platform cover of the South Mangyshlak NGB. The boundaries of the tectonic elements are: 1 – of the first order; 2 – of the second order; 3 – the main place of birth of oil and gas, 4 – the location of the section shown in Fig. 2.

I – North Ustyurt syneclise: I₁ – Yuzhno-Buzachinsky trough, I₂ – Kyrynsko-Tokubaysky shaft, I₃ – Arystanskaya step; II – Mangyshlak dislocation system: II₁ – Karataussky shaft, II₂ – Chakyrkansky trough, II₃ – Beke-Bashkuduksky shaft, II₄ – East Mangyshlak dislocations; III – South Mangyshlak trough: III₁ – Segendyk depression, III₂ – Zhetybai-Uzen stage, III₃ – Kokumbai monocline, III₄ – Karagiinskaya saddle, III₅ – Zhaz-Gurlinskaya depression, III₆ – Peschanomyssko-Rakushechnaya uplift zone, III₇ – Aksu-Kendyrlynskaya step, III₈ – Karynzharlyk saddle, III₉ – Uchkuduk depression; IV – Karabogaz arch

В составе фундамента широко представлены преимущественно первично терригенные осадочные породы, преобразованные на стадии зеленосланцевого метаморфизма, прорванные позднепалеозойскими гранитоидами. Метаморфические породы полностью утратили свой изначальный коллекторский потенциал. В гранитоидах Песчаномысско-Ракушечной зоны поднятий на площади Оймаша открыто промышленное скопление нефти. Здесь же в некоторых скважинах были получены притоки нефти и из вторичных коллекторов метаморфических сланцев.

На большей части Южно-Мангышлакского НГБ разрез пермско-триасового комплекса начинается со слабо дислоцированных отложений триасового возраста, и лишь в Караауданской и Центрально-Мангышлакской раннекиммерийских складчатых зонах в низах осадочного разреза появляются верхнепермские красноцветные терригенные толщи (рис. 2). В основании триасового разреза залегают пестроцветные преимущественно континентальные отложения нижнего триаса.

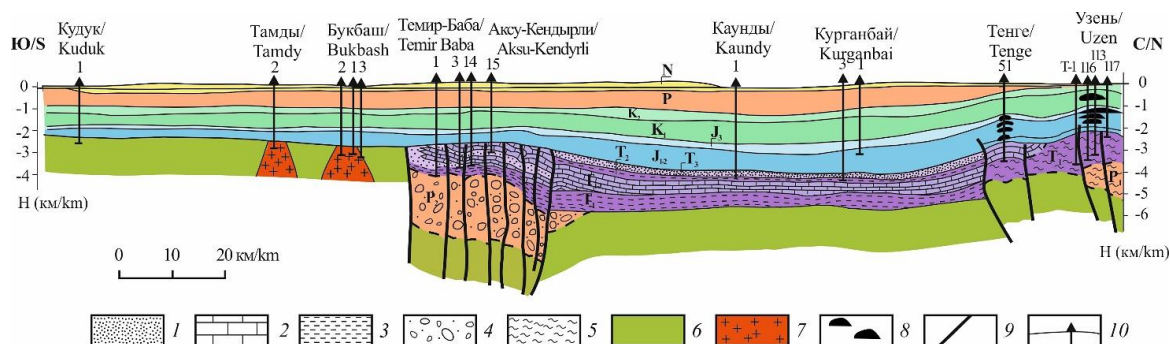


Рис. 2. Геологический разрез по линии Кудук – Каунды – Узень. Породы: 1 – вулканогенно-терригенные; 2 – терригенно-карбонатные; 3 – терригенные (алевритисто-аргиллитовые); 4 – конгломерато-песчаниковые; 5 – песчаниково-алевролитовые; 6 – метаморфические породы; 7 – граниты; 8 – залежи нефти и газа; 9 – разрывы; 10 – скважины /

Fig. 2. Geological section along the Kuduk-Kaundy-Uzen line. Rocks: 1 – volcanic-terrigenous; 2 – terrigenous-carbonate; 3 – terrigenous (silt-mud); 4 – conglomerate-sandstone; 5 – sandstone-siltstone; 6 – metamorphic rocks; 7 – granites; 8 – oil and gas deposits; 9 – fractures; 10 – wells

Продуктивная часть доюрского комплекса начинается с карбонатно-терригенной толщи позднеоленекского возраста [Попков, Попков, 2024]. Нефтегазоносность толщи доказана в пределах Южножетыбайско-Тенгинской антиклинальной зоны (месторождения Южный Жетыбай, Тасбулат и др.).

Вулканогенно-карбонатная нефтегазоносная формация среднего триаса залегает с размывом на подстилающих отложениях. В ее составе выделяется три литологических толщи: вулканогенно-доломитовая, известняково-вулканогенная и вулканогенно-известняковая. Подавляющее большинство триасовых скоплений нефти и газа на Южном Мангышлаке связано именно с этой формацией. Сменяющая ее терригенная формация нижнего триаса сохранилась от предюрского размыва лишь в наиболее погруженных районах Южно-Мангышлакского прогиба. Основные скопления УВ приурочены к базальной песчано-гравелитовой пачке.

Юрско-неогеновый плитный комплекс развит в пределах НГБ повсеместно, достигая в депрессионных зонах мощности 4,0–4,5 км. Основные запасы УВ связаны с терригенной юрской продуктивной толщей. Кроме того, в меловых отложениях открыты залежи газа на месторождениях Узень (северный борт Южно-Мангышлакского прогиба) и Кансу (Восточно-Мангышлакские дислокации), а в пределах Беке-Башкудукского вала и Тюбкарагана известны крупные скопления битумов и высоковязкой нефти.

Результаты исследований и их обсуждение

В результате проведенных исследований в подземной гидросфере НГБ выделен вертикальный ряд гидрогеологических систем. При этом помимо литолого-стратиграфического принципа использовались и термобарические параметры подземной гидросферы, позволяющие определять границы систем с учетом условий существования залежей УВ и пластовых вод.

Гидрогеологическая система грунтовых вод неоген-четвертичных отложений зоны диагенеза. Отличительной особенностью подземных вод данной системы является их безнапорный характер и преимущественно инфильтрационный генезис. Гидродинамический режим её во многом определяется орографическими условиями бассейна, а также гипсометрическим положением подстилающих водоупорных отложений позднеолигоцен-раннемиоценового возраста. Воды холодные, с температурой не выше 16 °С, с минерализацией, как правило, от 1–5 г/л до 10–15 г/л. Водовмещающие породы представлены терригенными (четвертичные) и преимущественно карбонатными (неогеновые) разностями, низкая степень диагенетического преобразования которых, в сочетании с высокими градиентами уклона грунтового потока, способствует активному течению процессов выщелачивания, суффозии и формированию активной пористости с максимальными значениями до 48 %. На больших глубинах, более поздних стадиях диагенеза, в условиях окислительно-восстановительной обстановки происходит выпадение дополнительных порций осаждаемых минералов, способствующее снижению емкостно-фильтрационных свойств, что приводит к нарушению гидрогеологических характеристик водосодержащих толщ. Темп водообмена резко замедляется, и минерализация вод возрастает до 25–30 г/л, водообильность снижается до 0,01–0,03 л/с.

В отношении нефтегазоносности система бесперспективна, поскольку обладает высокой динамичностью и раскрытостью и может быть названа аконсервационной. Отмечаемые случаи наличия нефтяных примазок в низах торгонских отложений на Тюб-Карагане (структура Тюбеджик) связаны с их непосредственным залеганием на закированных битуминозных песках и песчаниках верхнего альба. Проникновение нефтяных УВ в торгонские образования определяется их непосредственной гидродинамической связью с подстилающими нефтенасыщенными породами.

Гидрогеологическая водонапорная система артезианских вод альб-нижнетуронских и неоком-аптских отложений зоны катагенеза. На всей площади НГБ от вышележающей системы она отделена мощной (до 1000 м) флюидоупорной толщей верхнетурон-нижнемиоценовых глинисто-карбонатных отложений, обусловившей напорный характер вод. Сложные геолого-структурные условия района, когда амплитуда подошвы системы по профилю Каунды – Узень (центральная часть Жазгурлигской депрессии – северный борт Южно-Мангышлакского прогиба, см. рис. 2) превышает 1600 м, при толщине не более 400 м, приводит к различного рода отклонениям в принятых грациях литогенетических делений. На большей части бассейна гидродинамические особенности системы определяются перепадом гидростатических давлений в направлении от областей питания (создания напора) к юго-западу, в сторону Каспийского моря, – предполагаемой некоторыми исследователями области разгрузки [Сыдыков и др., 1970]. На самом же деле, как показали исследования [Капченко, 1982], разгрузка глубокозалегающих подземных вод в Каспий не подтверждается ни балансовыми расчетами, ни гидрохимическими данными.

Пластовые давления системы, как правило, равны нормальному гидростатическому, либо несколько ниже, за исключением участков глубоких бессточных впадин дневной поверхности (Карагие, Узень, Асар и др.), то есть гидродинамическое равновесие системы можно записать в виде $R_{пл} \cong R_{нг} < R_{лит}$. Пластовые температуры системы составляют 35–45 °С, а на ряде площадей Песчаномысско-Ракушечной зоны достигают 55 °С и выше. В данной термобарической обстановке более активно протекают реакции взаимодействия твердой фазы отложений и пропитывающих их водных растворов.

Важнейшими литогенетическими процессами в разрезе меловых водосодержащих толщ являются гидратация минералов и формирование различных алюмосиликатов. Тип их в значительной мере определяется катионным обменом между рас-

творами и вмещающими породами. Кроме того, отметим активные процессы сульфидизации (главным образом пиритизации) за счет взаимодействия сероводорода растворов с гидроокислами железа. Широкое распространение пиритизированных конкреций в альб–нижнетуронских отложениях свидетельствует в пользу регионального течения описанных процессов.

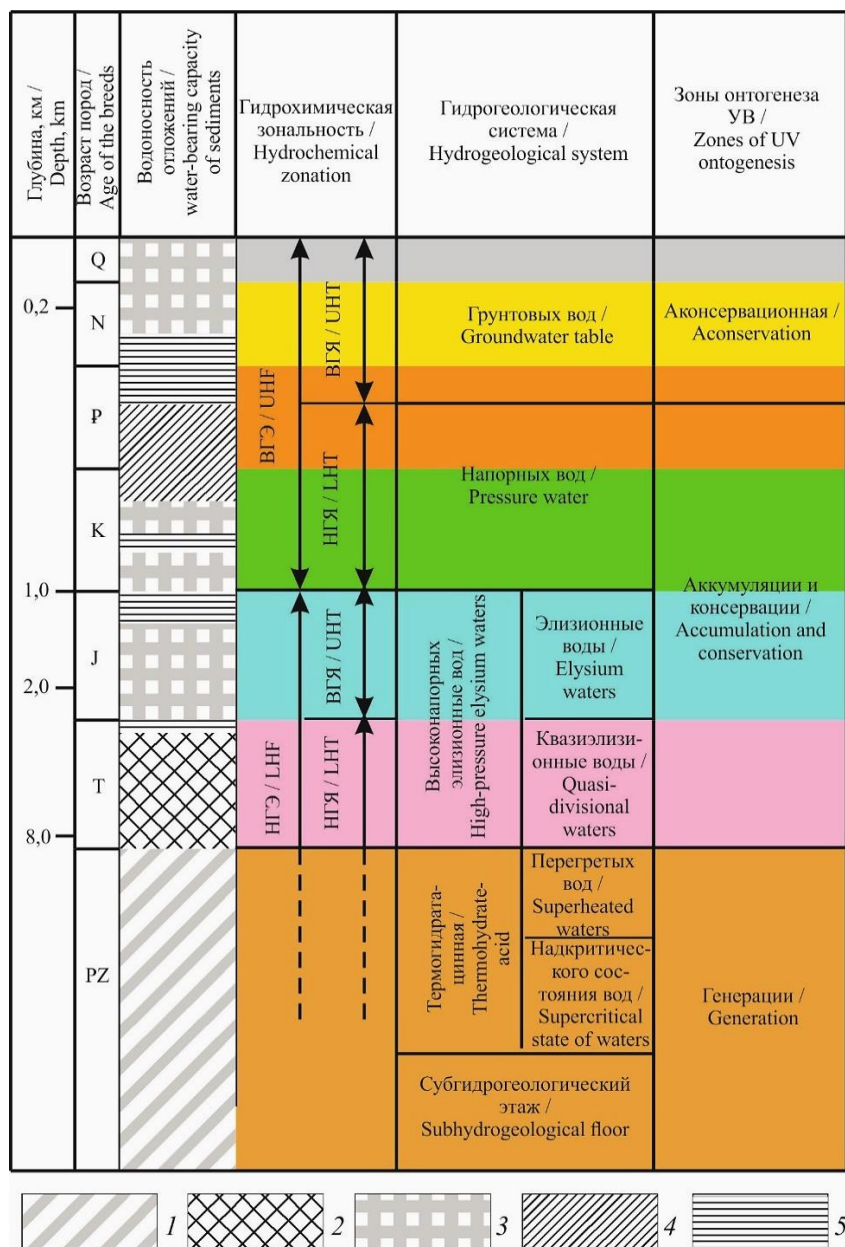


Рис. 3. Гидрологическая зональность Южно-Мангышлакского НГБ.

1 – зона распространения трещин автогидроразрыва; 2 – локально обводненные отложения зон распространения вторичных коллекторов; 3 – водоносные горизонты; 4 – локально обводненные отложения зон открытой трещиноватости; 5 – флюидоупоры. ВГЭ – верхний гидрогеологический этаж; НГЭ – нижний гидрогеологический этаж; ВГЯ – верхний гидрогеологический ярус; НГЯ – нижний гидрогеологический ярус /

Fig. 3. Hydrological zoning of the South Mangyshlak NGB. 1 – zone of autohydrofracturing cracks; 2 – locally water-saturated deposits of secondary reservoir zones; 3 – aquifers; 4 – locally water-saturated deposits of open-fracture zones; 5 – fluid barriers. VGE – upper hydrogeological floor; NGE – lower hydrogeological floor; VGY – upper hydro-geological tier; NGY – lower hydro-geological tier

Рассматриваемая система имеет ряд отличий от развитой выше системы грунтовых вод, в частности термобарические, литогидрохимические и другие; однако, несмотря на это, обе эти системы характеризуются некоторыми общими свойствами, а именно:

- латеральный характер движения подземных вод, во всяком случае, на большей части территории НГБ;
- инфильтрационный генезис пластовых вод (как правило, отношение $rNa/rCl > 1$).

Наиболее важные гидрогеологические параметры (гидрохимический и гидродинамический) как водонапорной системы артезианских вод альб-нижнетуронских и неоком-аптских отложений, так и системы грунтовых вод, довольно близкие. Это позволяет объединить их в единый верхний гидрогеологический этаж, а существующие различия рассматривать внутри гидрогеологических ярусов – верхнего, характеризующего систему грунтовых вод и нижнего, соответствующего системе артезианских вод (рис. 3).

Перспективы нефтегазоносности рассматриваемой системы артезианских вод оцениваются довольно скромно, но, главное, противоречиво, и причин здесь несколько. Во-первых, палео- и современные глубины залегания нижнетуронских и подстилающих образований свидетельствуют о том, что меловые отложения не проходили главную фазу [по Вассоевичу, 1976] нефтегазообразования. В связи с этим генерационные свойства отложений сводятся к нулю, что исключает сингенетичность залежей УВ в меловых образованиях (Узень, Тюбеджик, Дунга, Кансу, Тамды), формирование их за счет латеральной миграции и вынуждает искать источник нефти и газа в нижележащих отложениях. Во-вторых, гидрохимическая обстановка в недрах меловых комплексов (окислительная среда, маломинерализованные воды) является неблагоприятной для длительного сохранения и существования залежей УВ. В то же время, отложения характеризуются высокими коллекторскими (пористость 24–36 %) и относительно хорошими экранирующими свойствами пород, что и обеспечивает сохранность в них вторичных залежей нефти и газа. Причем эти залежи установлены в пределах неотектонически активных структур, что обеспечило транспортировку УВ на столь высокие стратиграфические уровни из нижележающих зон генерации.

В этой связи перспективы нефтегазоносности системы могут быть связаны главным образом с гидродинамически закрытыми структурами неотектонически мобильных зон (Центральный и Восточный Мангышлак). При этом гидродинамическая закрытость структур является необходимым условием сохранности залежей от механического разрушения, поскольку гидравлические градиенты системы довольно высокие. Таким образом, для рассматриваемой системы характерны лишь вторичные, как правило, газовые залежи, являющиеся результатом прорыва их из нижележащих отложений.

Расположенная ниже *гидрогеологическая система высоконапорных элизионных вод зоны глубокого катагенеза* идентифицируется с нижним гидрогеологическим этажом. Применительно к Южно-Мангышлакскому НГБ эта система соотносится с юрско-триасовым нефтегазоносным комплексом, верхней границей которого служит верхнеюрская флюидоупорная толща, равно как и границей между верхним и нижним гидрогеологическими этажами. При детальном рассмотрении данной системы вод можно обнаружить довольно резкие различия, характеризующие юрскую и триасовую толщи с точки зрения литофациальных, термобарических, гидрогеохимических и других условий, позволяющие выделить верхний и нижний гидрогеологические ярусы. В результате мы разделили данную систему на две подсистемы: собственно элизионных вод юрской продуктивной толщи (ЮПТ), с преимущественно вертикально-латеральными условиями флюидопроводимости, и квазиэлизионных вод триасовых (на некоторых площадях в ее состав вошли образования верхней пер-

ми) отложений, характеризующейся латерально-вертикальной проводимостью. Наиболее контрастны различия в гидрохимическом и гидродинамическом плане [Попков и др., 2023].

В разрезе ЮПТ получили развитие высокоминерализованные хлоркальциевые рассолы высокой степени метаморфизма, когда отношение rNa/rCl достигает 0,39, а минерализация изменяется от 140–160 г/л до 200 г/л. Воды обогащены йодом, бромом, стронцием, с очень низкими концентрациями сульфатов и гидрокарбонатов. На всей площади НГБ их состав уникально постоянен и нет четко выраженной взаимосвязи между минерализацией пластовых вод с одной стороны и глубиной залегания, нефтегазоносностью, площадью распространения (исключая области выхода отложений на дневную поверхность) с другой [Попков и др., 2023].

Гидродинамическое состояние подсистемы элизионных вод ЮПТ в первом приближении можно описать неравенством: $R_{пл} \cong R_{нг} \ll R_{лит}$ при незначительном превышении пластовых давлений над нормальным гидростатическим. Анализ распределения приведенных пластовых давлений по площади бассейна свидетельствует об их невысокой дифференциации, поскольку значения укладываются в рамки 26,4–28,4 МПа.

Гидрохимические и гидродинамические параметры квазиэлизионной подсистемы доюрских отложений (нижний гидрогеологический ярус) имеют свои особенности и в первую очередь – это устойчивая корреляционная связь минерализации вод и нефтегазоносности. На площадях и структурах с установленной нефтегазоносностью Жетыбай–Узеньской тектонической ступени, Песчаномысско–Ракушечной зоны сводовых поднятий, Карагинской седловины минерализация вод в 2–10 раз ниже, чем в ЮПТ и редко превышает 80 г/л. Наиболее часто встречаемая минерализация 15–30 г/л, но имеют место и более низкие значения 1,1–5,9 г/л (Южный Жетыбай, Сарсенбай, Пионерская). По химическому составу воды хлоридные натриевые, гидрокарбонатно-натриевого или хлоркальциевого типов. Для них характерны высокие концентрации гидрокарбонатов, повышенная сульфатность, а в составе водорастворенного газа – CO_2 . Содержание углекислого газа достигает 35–73 % (месторождения Бектурлы, Северо-Ракушечная, Южный Жетыбай). На структурах, где нефтегазоносность доюрских отложений не установлена (Восточно-Мангышлакские дислокации, Аксу-Кендырлинская ступень, Карабогазский свод), гидрохимический облик пластовых вод практически не отличается от вод ЮПТ (Попков и др., 2023).

Пластовые давления подсистемы, как правило, выше нормальных гидростатических ($R_{пл} > R_{нг}$), причем превышение достигает 10–17,1 МПа, при коэффициенте аномальности (K_a) 1,21–1,38 (Северо-Ракушечная, Северное Карагие, Пионерская), а градиент пластовых давлений приближается к литостатическому ($G_{Рпл} \cong G_{Рлит}$).

Рассматриваемая система характеризуется довольно широким диапазоном колебания пластовых температур от 60–70 °С (месторождения Узень, Бурмаша) до 200 °С и более (площади Каунды, Курганбай). С точки зрения стадий литогенетических преобразований степень катагенетической изменчивости отложений ЮПТ отвечает стадии протокатагенеза и, частично, мезокатагенеза для верхних горизонтов триаса. Степень углефикации РОВ свидетельствует о прохождении ими стадии МК₄.

Для ЮПТ это способствовало сохранению относительно высоких значений емкостно-фильтрационных параметров толщи (пористость до 24 %, проницаемость $350 \times 10^{-15} \text{ м}^2$), характерных для терригенных толщ с вертикально-латеральными условиями флюидопроводимости. Однако, масштабы латеральных перемещений флюидов следует оценивать очень осторожно, не предавая им определяющего значения в формировании залежей УВ. Во-первых, как показали исследования А.Е. Гуревича, даже без учета потерь на возможную вертикальную фильтрацию, скорость восходящего элизионного потока в песчаниках ЮПТ можно оценить не более чем в

0,4–0,036 см/год. Во-вторых, современная асимметрия бортов Южно-Мангышлакского прогиба, характеризующаяся значительным превышением северного борта над южным, сформировалась к среднему миоцену. Время формирования залежей УВ так же предсреднемиоценовое [Дмитриев и др., 1979] и при данных скоростях латеральной миграции перемещение УВ из зоны предполагаемой генерации в зоны аккумуляции составит за этот период не более 40 км, что не обеспечивает пространственную связь между ними.

Рассмотренная гидрогеологическая система высоконапорных элизионных вод зоны катагенеза отнесена к нефтегазоаккумулирующей (консервационной).

Термогидратационная система перегретых вод, суб- и надкритических газовых смесей и флюидов зоны метагенеза и регионального метаморфизма. В качестве нижней «стартовой» отметки была выбрана пластовая температура 700 °С, отвечающая кровле субгидрогеологического этажа. Данная температура является неким порогом существования структурированной воды, поскольку известно, что величина ионного произведения воды увеличивается с ростом температуры и давления, а структурированность воды, существующая в уменьшенной степени при критических температурах, исчезает, когда последняя приближается к 700 °С [Фокеев, 1972]. Величина структурированности воды зависит и определяется величиной давления. Если при атмосферном давлении и температуре 250–270 °С все молекулы переходят в мономерное состояние, то при большой плотности газовой фазы, когда давление достигает 200 кбар, существуют димеры воды [Файф и др., 1981]. В результате того, что резко сокращается возможность перемещения молекул в пространстве и их соударения становятся очень частыми, идет процесс их интенсивного распада на ионы. Отсутствие как таковой структурированной воды и её ассоциатов в этих условиях не позволяет выделить в этом интервале гидрогеологическую систему, поэтому этот температурный (и глубинный) интервал может быть отнесен к субгидрогеологическому этажу.

Однако практический интерес к данному этажу не должен ослабевать, как с точки зрения познания различных геохимических явлений (метаморфизм, магматическая и эпимагматическая геофазы пегматитового процесса), так и с точки зрения экспериментального моделирования. Именно в таких жестких условиях, в диапазоне температур от 700 до 1500 °С проведены опыты получения абиогенной нефти в Геофизической лаборатории Вашингтонского института Карнеги [Kolesnikov et al., 2009]. При температурах выше 800 °С и давлении несколько кбар отмечалась возможность получения гомогенной флюидалной массы в результате прямого синтеза H_2O и HCl , а также была обоснована возможность синтеза УВ нефтяного ряда [Чекалюк, 1971].

Учитывая, что взаимная растворимость жидкостей поддается расчетам на основе близости величины их диэлектрических постоянных, можно высказать предположение, что УВ с диэлектрической постоянной порядка 2–5 единиц будут хорошо растворяться в воде при температурах 500–600 °С и давлении более 500 кбар [Ферронский, Поляков, 1983], то есть параметрах, отвечающих расположенной выше термогидратационной системе перегретых вод, суб- и надкритических газовых смесей и флюидов зоны метагенеза и регионального метаморфизма.

Поскольку данная система в разрезах НГБ скважинами не вскрывается, границы её несколько условны, как собственно и характеристика, приводимая только по результатам экспериментальных данных и термодинамических расчетов и моделирования.

Состояние подземных флюидов термогидротационной системы практически исключает их латеральные перемещения, оставляя единственным возможным вертикальное направление миграции. Система характеризуется крайне высокой степенью изоляции глубинных зон, в которых основными факторами геофлюидодинамики яв-

ляются метагенные процессы, стимулирующие термодеструкцию горных пород и приводящие к формированию широкого спектра флюидов с последующей их эксфильтрацией и передачей пластовой энергии из нижней системы в верхнюю. Другими словами, обычным состоянием системы является наличие АВПД, значение которых периодически достигает литостатических с последующей релаксацией их автогидроразрывом и внедрением пересжатых флюидов в квазиэлизийную подсистему.

Отсутствие фактического материала по термогидротационной системе может быть компенсировано результатами экспериментальных исследований в области глубинных процессов в условиях высоких температур и давлений [Файф и др., 1981; Чекалюк, 1971], позволяющих ограничить нижний предел существования системы температурой 700 °С и, следовательно, глубинами около 25–40 км в зависимости от геолого-структурных особенностей НГБ. При этом сама система может иметь две подсистемы с температурами 200–450 °С (перегретые воды, суб- и надкритические водогазовые флюиды) и 450–700 °С (надкритическое состояние вод).

Гидродинамическое состояние подсистем можно записать неравенствами $R_{нг} << R_{пл} \rightarrow R_{лит}$ и $R_{пл} >> R_{лит}$ ($R_{пл}$ – пластовое, $R_{нг}$ – нормальное гидростатическое и $R_{лит}$ – литостатическое давления соответственно), характерными, как правило, для замкнутых систем. Это равновесие нарушается в периоды тектонической активизации, обеспечивающей в зонах максимальных деформаций проницаемость земной коры и проточность данных систем (по [Аникеев, 1964], – «упруго-пульсационный механизм» миграции флюидов).

Система скважинами не вскрыта. О возможных перспективах ее нефтегазоносности можно говорить, опираясь на данные экспериментального моделирования процессов глубинной генерации, миграции и консервации флюидов, в том числе и УВ. Известно, что после удаления физически связанной воды, происходит высвобождение гидроксильных вод, количество которых в полиминеральных глинах может достигать 31–72 г/кг, что в 1,7–5,5 раза превышает количество связанных вод [Магара, 1982]. Этот процесс начинается при температурах 360–420 °С и заканчивается при 580–620 °С, то есть охватывает практически целиком термогидротационную систему в выделенных нами границах. Согласно данным сверхглубокого бурения фильтрация и аккумуляция флюидов установлена на глубинах свыше 10 км, а экспериментальные данные допускают их существование на глубинах 20–25 км. В таких жестких термобарических условиях эти воды могут являться эффективным растворителем жидких и газообразных УВ. Их источником могут быть как мантийные эманации, так и сами породы, поскольку даже при температурах свыше 275 °С по данным [Магара, 1982] содержание высокомолекулярных битумоидов (C_{15} и выше) в пелитовых фракциях пород очень высокое и отношение C_{15} и выше/ $C_{орг.}$ достигает 160–280 мг/г.

Экспериментально установлено, что при температурах 200–300 °С растворимость нефти в воде может достигать 19000 см³/м³ [Файф и др., 1981]. Несложные расчеты показывают, что при температуре порядка 260 °С, давлении 102,2 МПа и средней растворимости нефти 500–1000 см³/м³ 1000-метровая глинистая толща при площади распространения 40х10³ км², выделяя 0,05 м³/т возрожденных вод, может иммобилизовать 5х10¹² м³ воды и вынести в коллекторы от 2,5 до 5х10⁹ м³ нефти, то есть от 0,6 до 1,2х10⁵ м³ с 1 км² [Колодий, 1982]. Эти экспериментальные данные позволяют отнести термогидротационную систему к потенциально нефтегазогенерирующей.

Выводы

В результате выполненных исследований разработана новая оригинальная модель гидрогеологической зональности Южно-Мангышлакского НГБ, включающая в себя ряд закономерно сменяющихся в разрезе гидрогеологических систем. Установлено,

что их гидрогеологические особенности во многом определяются характером вертикальной флюидопроводимости разреза, обеспечивающей масштабное вторжение в верхние горизонты земной коры высокоэнергетичных глубинных флюидов. Влияние последних на гидрохимический облик подземных вод возрастает с глубиной, достигая максимума в породах консолидированного основания (фундаменте) платформы, где превалирует вертикальная флюидопроводимость.

Гидрогеологическая зональность недр осадочного бассейна находится в тесной взаимосвязи с зональностью процессов генерации, миграции и аккумуляции нефти и газа: термогидратационная система идентифицируется с зоной их вероятной генерации, элизионная – с зоной аккумуляции и консервации, а инфильтрационная – с аконсервационной зоной. При этом продуктивность осадочного разреза находится в прямой зависимости от вертикальной флюидопроводимости разреза, определяющей стратиграфический диапазон нефтегазоносности. Отсюда следует, что геологоразведочные работы в первую очередь следует ориентировать на площади и участки новейшего флюидомассопереноса.

Выделенные в разрезе земной коры Южно-Мангышлакского прогиба гидрогеологические системы и их взаимосвязь с процессами онтогенеза УВ могут быть перенесены и на другие НГБ [Матусевич и др., 2001; Лукин, 2005; Pang et al., 2020] и, в частности, Восточного и Западного Предкавказья, где, как показано в работах [Даукаев и др., 2023; Даукаев, Абубакарова, 2024; Салтанова, 2025 и др.], можно проследить аналогичные закономерности в строении подземной гидросферы с соответствующей корректировкой их стратиграфической привязки.

Литература

1. Абукова Л.А., Волож Ю.А. Геофлюидодинамика глубокопогруженных зон нефтегазонакопления осадочных бассейнов // *Геология и геофизика*. – 2021. – № 8. – С. 1069–1080. DOI: 10.15372/GiG2021132.
2. Аникеев К.А. Аномально высокие пластовые давления в нефтяных и газовых месторождениях. М.: Недра, 1964. – 361 с.
3. Даукаев А.А., Абубакарова Э.А. Очаги генерации, нефтегазоподводящие каналы и скопления углеводородов – триединая флюидодинамическая система // *Нефтегазовое дело*. – 2024. – № 22. – С. 37–44. DOI: 10.17122/ngdelo-2024-6-37-44.
4. Даукаев А.А., Гайсумов М.Я., Бадаев С.В. Доюрское основание Терско-Каспийского прогиба в связи с проблемой глубинной нефти и формировании ее скоплений // *Геология и геофизика Юга России*. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 133–146. DOI: 10.46698/VNC.2023.19.53.010.
5. Вассоевич Н.Б. Теория осадочно-миграционного происхождения нефти // *Известия Академии наук СССР. Серия геологическая*. – 1976. – № 11. – С. 135–156.
6. Гуревич А.Е., Капченко Л.Н., Кругликов Н.М. Теоретические основы нефтяной гидрогеологии. Л.: Недра, 1972. – 272 с.
7. Дмитриев Л.П., Паламарь В.П., Попков В.И., Рабинович А.А. История формирования структуры Южного Мангышлака // *Геология нефти и газа*. – 1979. – № 1. – С. 17–22.
8. Дюнин В.И. Гидрогеодинамика глубоких горизонтов нефтегазоносных бассейнов. М.: Научный мир, 2000. – 472 с.
9. Капченко Л.Н. Гидрогеологические особенности существования нефти и газа на больших глубинах. // *Закономерности размещения и критерии прогноза глубоких и сверхглубоких залежей нефти и газа*. – Труды ВНИГРИ, 1982. – С. 133–144.
10. Колодий В.В. Роль подземных вод в формировании залежей нефти // *Гидрогеология и нефтегазоносность*. Минск: Наука и техника, 1982. – С. 25–46.
11. Лукин А.Е. Глубинная гидрогеологическая инверсия как глобальное синергетическое явление: теоретические и прикладные аспекты. Ст. 3. Глубинная гидрогеологическая инверсия и нефтегазоносность // *Геологический журнал*. – 2005. – № 2. – С. 44–61.
12. Магара К. Уплотнение пород и миграция флюидов. Прикладная геология нефти. М.: Недра, 1982. – 296 с.

13. Матусевич В.М., Курчиков А.Р., Рыльков А.В. Геофлюидалные системы Западно-Сибирского мегабассейна как фактор массопереноса вещества и энергий в 4D пространстве // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2001. – № 2. – С. 4–13.
14. Попков В.И., Ларичев В.В., Попков И.В. Структура глубоководных комплексов осадочных бассейнов: гидрогеологические аномалии и нефтегазоносность как следствие внедрения глубинных флюидов (на примере месторождений Южного Мангышлака) // Геотектоника. – 2023. – № 3. – С. 41–66. DOI: 10.31857/S0016853X23030050.
15. Попков В.И., Попков И.В. Нефтегазоносные формационные комплексы триаса юго-запада Туранской плиты // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 98–107. DOI: 10.46698/VNC.2024.17.41.013.
16. Салтанова А.Г. Развитие инверсионных зон гидрогеохимического разреза Восточного Предкавказья // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов. – 2025. – № 4. – С. 27–46. DOI: 10.24412/1728-7634-2025-4-27-46.
17. Сыдыков Ж.С., Кукабаев К., Кутешев А.К. Подземные воды Мангышлак-Устюртской нефтегазоносной провинции. Алма-Ата: Наука, 1970. – 199 с.
18. Файф У., Прайф Н., Томпсон А. Флюиды в земной коре. М.: Мир, 1981. – 436 с.
19. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы. М.: Наука, 1983. – 276 с.
20. Фокеев В.М. Изменение величины удельной электропроводности, константы ионного произведения воды и структурированности при абсолютной температуре кипения воды и водных растворов // Известия высших учебных заведений. Геологи и разведка. – 1972. – № 9. – С. 83–88.
21. Чекалюк Э.Б. Термодинамические основы теории минерального происхождения нефти. Киев: Наукова думка, 1971. – 256 с.
22. Boullier A.-M. Fluid inclusions: tectonic indicators // Journal of Structural Geology. – 1999. – No. 21. – pp. 1229–1235.
23. Cox S.F. Faulting processes at high fluid pressures: An example of fault-valve behavior from the Wattle Gully Fault, Victoria, Australia // Journal of Geophysical Research. – 1995. – No. 100. – pp. 12841–12859.
24. Garven G.A. Hydrogeologic model for the formation of the giant oil sands deposits of the Western Canada sedimentary basin // American Journal of Science. – 1989. – Vol. 289. No. 2. – pp. 105–166.
25. Kolesnikov A., Goncharov A., Kutcherov V. Methane-derived hydrocarbons produced under upper-mantle conditions // Nature Geoscience. – 2009 – No. 2. – pp. 566–570.
26. Lichtner P.C. The quasi-stationary state approximation to coupled mass transport and fluid-rock interaction in a porous media // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1988. – Vol. 52. No. 56. – pp. 143–165.
27. Lichtner P.C., Steefel C.I., Oelkers E.H. Reactive transport in porous media // Reviews in Mineralogy. – 1996. – No. 34. – pp. 105–115.
28. Nguyen P.T., Cox S.F., Harris L.B., Powell C.McA. Faultvalve behaviour in optimally oriented shear zones: an example at the Revenge gold mine, Kambalda, Western Australia // Journal Structural Geology. – 1998. – Vol. 20. No. 12. – pp. 1625–1640.
29. Nur A., Walder J. Time-dependent hydraulics of the Earth's crust. // The Role of Fluids in Crustal Processes, Studies in Geophysics. / Ed. C. Fairhurst. – Washington: National Academy Press, 1990. – pp. 113–127.
30. 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 Research. – 2011. – Vol. 47. – pp. 45–56. DOI: 10.1029/2010WR009346.
31. Pang X., Jia C., Zhang K., Li M., Wang Y., Peng J., Li B., Chen, J. The dead line for oil and gas and implication for fossil resource prediction // Earth System Science Data. – 2020. – No. 12. – pp. 577–590. DOI: 10.5194/essd-12-577-2020.
32. Person M., Butler D., Gable C.W., Villamil T., Wavrek D., Schelling D. Hydrodynamic stagnation zones: A new play concept for the Llanos Basin, Colombia // AAPG Bulletin. – 2012. – Vol. 96. – No. 1. – pp. 23–41. DOI: 10.1306/08101111019.
33. Toth J. Gravitational systems of groundwater flow: theory, evaluation, utilization / Ed. S. Bachu. – Cambridge: Cambridge University Press, 2009. – 311 p.

34. Zhao J., Al-Aasm I. New insights into petroleum migration – accumulation dynamic systems and their division within petroleum systems // *Journal of Earth Science*. – 2012. – Vol. 23. No. 3. – pp. 744–756.

References

1. Abukova L.A., Volozh Yu.A. Geofluidynamics of deep-seated oil and gas accumulation zones in sedimentary basins. *Geology and Geophysics*. 2021. No. 8. pp. 1069–1080. DOI: 10.15372/GiG2021132. (In Russ.)
2. Anikeev K.A. Abnormally high reservoir pressures in oil and gas fields. Moscow. Nedra. 1964. 361 p. (In Russ.)
3. Daukaev A.A., Abubakarova E.A. Sources of generation, oil and gas conduits, and hydrocarbon accumulations: a triune fluidodynamic system. *Oil and Gas Business*. 2024. No. 22. pp. 37–44. DOI: 10.17122/ngdelo-2024-6-37-44. (In Russ.)
4. Daukaev A.A., Gaisumov M.Ya., Badaev S.V. Pre-Jurassic basement of the Terek-Caspian basin in connection with the problem of deep oil and the formation of its accumulations. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 133–146. DOI: 10.46698/VNC.2023.19.53.010. (In Russ.)
5. Vassoevich N.B. The theory of sedimentary-migration origin of oil. *Izvestiya Akademii Nauk USSR. Seriya Geologicheskaya*. 1976. No. 11. pp. 135–156. (In Russ.)
6. Gurevich A.E., Kapchenko L.N., Kruglikov N.M. Theoretical foundations of oil hydrogeology. Leningrad. Nedra. 1972. 272 p. (In Russ.)
7. Dmitriev L.P., Palamar V.P., Popkov V.I., Rabinovich A.A. The history of the formation of the structure of the Southern Mangyshlak. *Russian Oil and Gas Geology*. 1979. No. 1. pp. 17–22. (In Russ.)
8. Dyunin V.I. Hydrogeodynamics of deep horizons in oil and gas basins. Moscow. Scientific World. 2000. 472 p. (In Russ.)
9. Kapchenko L.N. Hydrogeological features of the existence of oil and gas at great depths. Patterns of Distribution and Criteria for Forecasting Deep and Ultra-Deep Oil and Gas Deposits. *Proceedings of VNIGRI*. 1982. pp. 133–144. (In Russ.)
10. Kolodiy V.V. The role of groundwater in the formation of oil deposits. *Hydrogeology and Oil and Gas Potential*. Minsk. Nauka i Tekhnika. 1982. pp. 25–46. (In Russ.)
11. Lukin A.E. Deep hydrogeological inversion as a global synergetic phenomenon: theoretical and applied aspects. Article 3. Deep hydrogeological inversion and oil and gas potential. *Geological Journal*. 2005. No. 2. pp. 44–61. (In Russ.)
12. Magara K. Rock compaction and fluid migration. *Applied Petroleum Geology*. Moscow. Nedra. 1982. 296 p. (In Russ.)
13. Matusevich V.M., Kurchikov A.R., Rylkov A.V. Geofluidal systems of the West- Siberian mega-basin as a factor of mass transfer of matter and energies in 4D space. *Oil and Gas Studies*. 2001. No. 2. pp. 4–13. (In Russ.)
14. Popkov V.I., Larichev V.V., Popkov I.V. Structure of deep-seated sedimentary basin complexes: hydrogeological anomalies and oil and gas potential as a result of deep fluid intrusion (based on the Southern Mangyshlak fields). *Geotectonics*. 2023. No. 3. pp. 41–66. DOI: 10.31857/S0016853X23030050. (In Russ.)
15. Popkov V.I., Popkov I.V. Oil and gas bearing formation complexes of the Triassic of the South-West Turan plate. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 98–107. DOI: 10.46698/VNC.2024.17.41.013. (In Russ.)
16. Saltanova A.G. Development of inversion zones of the hydrogeochemical section of the Eastern Ciscaucasia. *Geology. Proceedings of the Department of Earth Sciences and Natural Resources*. 2025. No. 4. pp. 27–46. DOI: 10.24412/1728-7634-2025-4-27-46. (In Russ.)
17. Sydykov Zh.S., Kukabaev K., Kugeshev A.K. Groundwater of the Mangyshlak-Ustyurt oil and gas province. Alma-Ata. Nauka. 1970. 199 p. (In Russ.)
18. Fyfe W., Pryf N., Thompson A. Fluids in the Earth's crust. Moscow. Mir. 1981. 436 p. (In Russ.)

19. Ferronsky V.I., Polyakov V.A. Isotopy of the hydrosphere. Moscow. Nauka. 1983. 276 p. (In Russ.)
20. Fokeev V.M. Change in the value of specific electrical conductivity, the constant of the ionic product of water, and the structure at the absolute boiling point of water and aqueous solutions. News of Higher Educational Institutions. Geology and Exploration. 1972. No. 9. pp. 83–88. (In Russ.)
21. Chekaluk E.B. Thermodynamic foundations of the theory of the mineral origin of oil. Kiev. Naukova Dumka. 1971. 256 p. (In Russ.)
22. Boullier A.-M. Fluid inclusions: tectonic indicators. Journal of Structural Geology. 1999. No. 21. pp. 1229–1235.
23. Cox S.F. Faulting processes at high fluid pressures: An example of fault-valve behavior from the Wattle Gully Fault, Victoria, Australia. Journal of Geophysical Research. 1995. No. 100. pp. 12841–12859.
24. Garven G.A. Hydrogeologic model for the formation of the giant oil sands deposits of the Western Canada sedimentary basin. American Journal of Science. 1989. Vol. 289. No. 2. pp. 105–166.
25. Kolesnikov A., Goncharov A., Kutcherov V. Methane-derived hydrocarbons produced under upper-mantle conditions. Nature Geoscience. 2009 No. 2. pp. 566–570.
26. Lichtner P.C. The quasi-stationary state approximation to coupled mass transport and fluid-rock interaction in a porous media. Geochimica et Cosmochimica Acta. 1988. Vol. 52. No. 56. pp. 143–165.
27. Lichtner P.C., Steefel C.I., Oelkers E.H. Reactive transport in porous media. Reviews in Mineralogy. 1996. No. 34. pp. 105–115.
28. Nguyen P.T., Cox S.F., Harris L.B., Powell C.McA. Faultvalve behaviour in optimally oriented shear zones: an example at the Revenge gold mine, Kambalda, Western Australia. Journal Structural Geology. 1998. Vol. 20. No. 12. pp. 1625–1640.
29. Nur A., Walder J. Time-dependent hydraulics of the Earth's crust. The Role of Fluids in Crustal Processes, Studies in Geophysics. Ed. C. Fairhurst. Washington. National Academy Press. 1990. pp. 113–127.
30. 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 Research. 2011. Vol. 47. pp. 45–56. DOI: 10.1029/2010WR009346.
31. Pang X., Jia C., Zhang K., Li M., Wang Y., Peng J., Li B., Chen, J. The dead line for oil and gas and implication for fossil resource prediction. Earth System Science Data. 2020. No. 12. pp. 577–590. DOI: 10.5194/essd-12-577-2020.
32. Person M., Butler D., Gable C.W., Villamil T., Wavrek D., Schelling D. Hydrodynamic stagnation zones: A new play concept for the Llanos Basin, Colombia. AAPG Bulletin. 2012. Vol. 96. No. 1. pp. 23–41. DOI: 10.1306/0810111019.
33. Toth J. Gravitational systems of groundwater flow: theory, evaluation, utilization. Ed. S. Bachu. Cambridge. Cambridge University Press. 2009. 311 p.
34. Zhao J., Al-Aasm I. New insights into petroleum migration – accumulation dynamic systems and their division within petroleum systems. Journal of Earth Science. 2012. Vol. 23. No. 3. pp. 744–756.

УДК 622.276:519.816

DOI: 10.46698/VNC.2026.25.10.001

Оригинальная статья

Алгоритм выбора скважин-кандидатов для зарезки боковых стволов в условиях неопределенности геолого-промысловой информации

В.Ш. Мухаметшин¹, Р.А. Гилязетдинов¹, Д.С. Садуакасов²,
А.Б. Бакиева³

¹ Институт нефти и газа, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Октябрьском), Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54а;

² Университет Есенова, Республика Казахстан, 130000, г. Актау, e-mail: danabek1974@mail.ru;

³ Филиал ТОО «КМГ Инжиниринг» «КазНИПИМунайгаз», Республика Казахстан, 130000, г. Актау

Статья поступила: 29.12.2025, доработана: 17.04.2026, принята к публикации: 20.04.2026

Резюме: Актуальность работы. Работа посвящена разработке алгоритма выбора скважин-кандидатов для зарезки боковых стволов в условиях неопределённости геолого-промысловой информации. Недостаток релевантных методик выбора скважин при длительной разработке карбонатных коллекторов турнейского яруса Волго-Уральской нефтегазоносной провинции снижает эффективность управленческих решений и геолого-технических мероприятий. **Цель исследования.** Создание алгоритма подбора скважин-кандидатов для эффективной реализации зарезки боковых стволов на основе комплексного анализа геолого-технологических показателей. **Методы исследования.** Объектом исследования являются залежи карбонатных коллекторов турнейского яруса. Скважины были разделены в зависимости от значения продуктивности для выявления скрытых закономерностей. Использованы методы распознавания образов, статистические тесты и последовательная процедура Вальда для построения зависимостей геолого-технологических показателей от показателя частоты. **Результаты.** Построены зависимости изменения параметров для различных групп скважин, разработан алгоритм оценки информативности критериев и прогнозные модели эффективности зарезки боковых стволов, основанные на взаимосвязи прироста дебита нефти с набором показателей. Показана возможность применения алгоритма для оптимизации процессов добычи нефти и повышения эффективности зарезки боковых стволов.

Ключевые слова: зарезка боковых стволов, методы распознавания образов, залежи карбонатных коллекторов турнейского яруса, процедура Вальда, геолого-статистическое моделирование, коэффициент продуктивности, информативность геолого-промысловых параметров.

Для цитирования: Мухаметшин В.Ш., Гилязетдинов Р.А., Садуакасов Д.С., Бакиева А.Б. Алгоритм выбора скважин-кандидатов для зарезки боковых стволов в условиях неопределенности геолого-промысловой информации. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 160–172. DOI: 10.46698/VNC.2026.25.10.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.25.10.001

Original paper

Algorithm for selecting candidate wells for sidetracking under conditions of uncertain geological and field data

V.Sh. Mukhametshin¹, R.A. Gilyazetdinov¹, D.S. Saduakassov²,
A.B. Bakiyeva³

¹ Institute of Oil and Gas, Ufa State Petroleum Technological University (Oktyabrsky Branch),
54a Devonskaya Str., Oktyabrsky 452607, Russian Federation;

² Yesenov University, Aktau 130000, Republic of Kazakhstan,
e-mail: danabek1974@mail.ru;

³ Branch of KMG Engineering LLP “KazNIPImunaigas”, Aktau 130000,
Republic of Kazakhstan

Received: 29.12.2025, revised: 17.04.2026, accepted: 20.04.2026

Abstract: Relevance. The work is devoted to the development of an algorithm for selecting candidate wells for sidetracking in conditions of uncertainty of geological and field information. The lack of relevant well selection methods during long-term development of Tournaisian carbonate reservoirs of the Volga-Ural oil and gas province reduces the effectiveness of management decisions and geological and technical measures. **Aim.** To develop an algorithm for selecting candidate wells for the effective implementation of sidetracking based on a comprehensive analysis of geological and technological indicators. **Methods.** The object of the study is the deposits of carbonate reservoirs of the Tournaisian stage. The wells were divided based on the productivity value to identify hidden patterns. **Results.** Parameter change dependencies were constructed for various well groups, and an algorithm for assessing the information content of criteria and predictive models for sidetracking efficiency were developed, based on the relationship between oil flow rate increment and a set of indicators. The potential of the algorithm for optimizing oil production processes and increasing the efficiency of sidetracking is demonstrated.

Keywords: sidetracking, pattern recognition methods, Tournaisian carbonate reservoirs, Wald procedure, geological-statistical modeling, productivity index, information content of geological and production parameters.

For citation: Mukhametshin V.Sh., Gilyazetdinov R.A., Saduakassov D.S., Bakiyeva A.B. Algorithm for selecting candidate wells for sidetracking under conditions of uncertain geological and field data. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 160–172. DOI: 10.46698/VNC.2026.25.10.001

Введение

На текущий момент одной из ключевых проблем недропользователей является необходимость повышения эффективности вовлечения в процесс дренирования остаточных запасов нефти, сосредоточенных в сложных горно-геологических условиях залегания продуктивных пластов [Ibatullin et al., 2012; Зайцев, Распопов, 2020; Кулешова и др., 2025; Oryngozhin et al., 2012; Гилязетдинов и др., 2024]. Среди широкого разнообразия используемых методов увеличения нефтеотдачи наибольшее распространение получила технология резки боковых стволов (ЗБС). Сущность данного мероприятия сводится к созданию в «материнском стволе» дополнительного вертикального или горизонтального ствола, при помощи которого происходит вскрытие ранее незатронутой части продуктивного пласта, что позволяет увеличить площадь зоны дренирования, уплотнить текущую сетку скважин и создать необхо-

димые условия для организации результативной закачки воды за счет перераспределения агента в поровом пространстве. Обзор работ, посвященных опыту проведения ЗБС на месторождениях крупных нефтегазоносных провинций, показывает следующее: надежный подбор скважин-кандидатов осложнен отсутствием научно-методических инструментов для обработки геолого-промысловой информации, в частности, не установлен комплекс параметров, оказывающий наибольшее влияние на технологические показатели эксплуатации объектов [Yusuf et al., 2025; Belhaj et al., 2020; Gbadamosi et al., 2019; Valeev et al., 2019; Gilyazetdinov et al., 2024]. Наличие данных сведений является основой эффективного и обоснованного строительства боковых стволов и позволяет сказать о возможности рентабельного доизвлечения остаточных запасов нефти без необходимости использования значительного объема материально-технических ресурсов.

Помимо этого, существующие подходы к оценке коэффициента продуктивности добывающих скважин во многом сосредоточены на использовании базовых зависимостей, часто не отражающих реальную динамику изменения данного показателя во времени [Belhaj et al., 2021; Negin et al., 2017; Мухаметшин, Кулешова, 2023; Madani et al., 2019]. Наличие бокового ствола в скважине оказывает влияние на границы дренирования запасов нефти, что при моделировании технологических процессов без соответствующих научно-методических основ приводит к возникновению различного рода неопределённостей.

В условиях разработки залежей карбонатных коллекторов достоверное определение возможности зарезки боковых стволов позволяет решать ряд задач, связанных с повышением эффективности освоения запасов нефти [Chen et al., 2025; Мухаметшин и др., 2024; Qu et al., 2024; Saduakasov et al., 2025]. Как показывают результаты сравнительной интерпретации динамики выхода скважин на режим, как с боковыми стволами, так и без них, в различных геолого-технологических условиях разработки залежей, изменение коэффициента продуктивности зависит от широкого перечня факторов, учёт которых осуществляется лишь по косвенным промысловым данным [Salem et al., 2024; Bayamirova et al., 2025; Баталов и др., 2022; Meshalkin et al., 2025; Ye et al., 2025; Мударисова, Лукьянова, 2025].

Помимо этого, ключевой проблемой эффективной реализации зарезки боковых стволов является обоснованный выбор скважин-кандидатов, который в современных условиях осуществляется при помощи различных подходов. Широкое распространение получили, например, методы распознавания образов [Гилиязетдинов и др., 2023; Du et al., 2024], базирующиеся на поисках скрытых закономерностей между параметрами и позволяющие использовать лучшие практики разработки нефтяных месторождений. Несмотря на наличие в достаточном объеме геолого-промысловых данных, подбор скважин-кандидатов для осуществления зарезки боковых стволов во многом сводится к интегральной оценке объема остаточных запасов нефти и расчетам рентабельности их освоения [Ogbu et al., 2024; Abdullayeva, Imamverdiyev, 2019; Ахметов и др., 2022]. При этом формируемое в результате интерпретации данных представление о потенциальном коэффициенте продуктивности зачастую базируется на верхнеуровневой оценке [Ning et al., 2022; Хузин и др., 2021; Tadjer et al., 2021], что не всегда соответствует фактическим показателям работы скважин. Исходя из этого, вопрос создания алгоритма подбора потенциальных скважин-кандидатов для осуществления зарезки боковых стволов является актуальной задачей рационального использования запасов жидких углеводородов.

Материалы и методы

Объектом исследования выступают длительно разрабатываемые залежи карбонатных коллекторов турнейского яруса, информация по которым получена в ходе

обобщения данных эксплуатации более чем 1000 скважин различного назначения. На начальном этапе произведено разделение скважин на две группы в зависимости от наличия или отсутствия бокового ствола. При этом рассматривались те скважины, которые эксплуатируются не менее 12 месяцев с момента осуществления ЗБС, с учетом времени их выхода на режим (ВНР). В таблице 1 представлено распределение скважин по группам в зависимости от средних значений параметров месячной добычи нефти и времени ВНР.

Таблица 1 / Table 1

**Сводный верхнеуровневый анализ исходных данных /
Summary high-level analysis of the source data**

Номер группы / Доля от общего объема выборки / Group ID / Proportion of total sample	Среднее значение годовой добычи нефти, т/год / Average value of annual oil production, t/year	Среднее значение времени выхода на режим, сут. / Average value of time to reach stable production, days
Скважины без бокового ствола/ Wells without sidetrack		
1 / 11,5 %	4470	84
2/ 5,5 %	2098	67
3/27 %	7012	174
4/41 %	7911	122
5/15 %	6784	104
Скважины с боковым стволом/ Wells with sidetrack		
1 / 10,5 %	9265	211
2/50 %	9876	189
3/39,5 %	9467	135

Отметим, что для скважин с боковым стволом установлено наибольшее время выхода скважин на режим, и это может быть обусловлено значительной кольтатацией призабойной зоны пласта продуктами бурения и освоения, в результате чего происходит закупоривание фильтрационных каналов. Еще одной закономерностью для данной группы объектов является наличие обратной зависимости между временем ВНР и продуктивностью, в то время как по скважинам без бокового ствола данный тренд не подтверждается. На следующем этапе внутри каждой из двух групп произведено дополнительное разделение объектов по тектонико-стратиграфическому критерию с использованием дискриминантного анализа по комплексу геолого-промысловых параметров, характеризующих условия залегания пластов, фильтрационно-емкостные свойства и физико-химические характеристики добываемой продукции. Наибольший процент верно сгруппированных объектов установлен для скважин с боковыми стволами и составляет 94,3 % (6 групп), при наименьшем значении данного показателя – 84,5 % по другой группе скважин (6 групп). Сравнение полученных результатов с ранее проведенным разделением скважин на группы по одному из базовых критериев демонстрирует релевантность использования дискриминантного анализа в решении задач классификации и поиска скрытых закономерностей.

Для реализации алгоритма подбора скважин-кандидатов под зарезку боковых стволов воспользуемся последовательной процедурой Вальда – одним из распротраненных статистических тестов, позволяющим по мере обновления информации проводить наблюдение за трендом изменения уровня значимости показателей. За счет ранее проведенного распределения скважин на группы (в зависимости от наличия или отсутствия дополнительного ствола) представляется возможным оценить начальные геолого-технологические условия эксплуатации до реализации ЗБС. В качестве переменных, оказывающих влияние на продуктивность бокового ствола, рассмотрим следующие параметры:

- $K_{прод}$ – средний коэффициент продуктивности до момента проведения ЗБС, т/сут. МПа;
 $P_{пл}$ – пластовое давление, МПа;
 $H_э$ – эффективная нефтенасыщенная толщина, м;
 H_1 – общая толщина пласта, м;
 $H_{зал}$ – глубина залегания пласта, м;
 K_H – коэффициент нефтенасыщенности;
 $K_{пр}$ – коэффициент проницаемости, 10^{-3} мкм²;
 m – пористость горных пород, доли ед.;
 μ_1 – вязкость пластовой нефти, мПа·с;
 ρ_1 – плотность пластовой нефти, кг/м³;
 μ_2 – вязкость пластовой воды, мПа·с;
 ρ_2 – плотность пластовой воды, кг/м³;
 W_1 – обводненность продукции скважин до момента проведения ЗБС, доли ед.;
 Q_1 – максимальный дебит нефти скважины до момента проведения ЗБС, т/сут.;
 Q_2 – дебит нефти скважины на момент проведения ЗБС, т;
 Q_3 – накопленная добыча нефти на момент проведения ЗБС, тыс.т.

На рисунке 1 представлен пример распределения скважин в зависимости от значений четырех геолого-технологических параметров. По остальным показателям построены аналогичные универсальные модели.

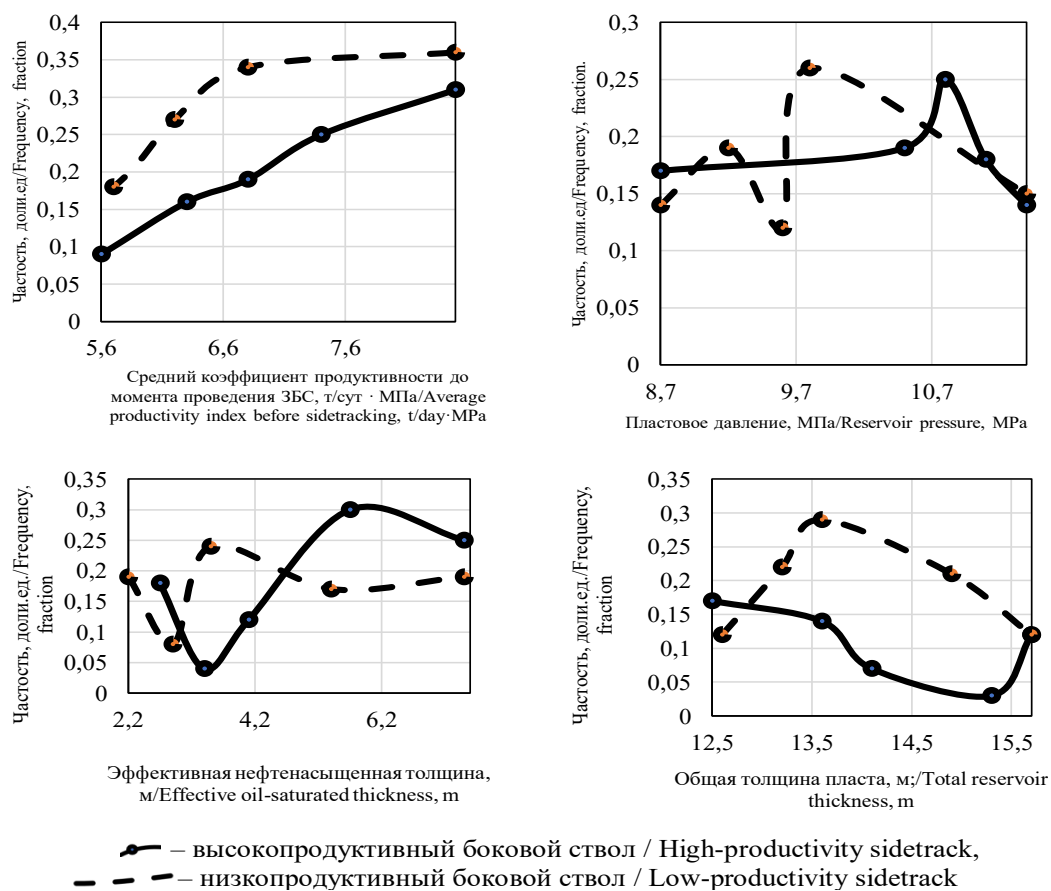


Рис. 1. Распределение скважин в зависимости от изменения значений геолого-технологических показателей /

Fig. 1. Well distribution as a function of changes in geological and technological parameters

Области изменения различных параметров были автоматически выделены на основе расчета показателя частоты. Интерпретация данных подчеркивает нелинейный тренд изменения при высокой дисперсии, что необходимо учитывать при реализации процессов моделирования. Исходя из полученных результатов, отметим, что между исходными параметрами прослеживается в целом неоднородная связь, которая еще раз подтверждает наличие высокого уровня неопределенности, возникающего при интерпретации данных моделирования. Максимальная эффективность зарезки боковых стволов установлена по всем группам объектов при следующих верхнеуровневых критериях: наличие эффективной нефтенасыщенной толщины не менее 5,7 м при общей толщине пласта в пределах от 12,5 до 13,9 м и накопленной добыче нефти не менее 75 тыс. т. В рамках текущих геолого-технологических условий разработки объектов более 85 % скважин от общего числа являются потенциальными кандидатами для реализации данного вида технологической операции, что не является релевантным результатом, поэтому с использованием известных статистических подходов введем понятие «информативность критерия ($I(x_j^i)$)», которое определяется по формуле (1), и проведем его расчет для каждого из 16 параметров:

$$I(x_j^i) = D(x_j^i) \cdot \frac{1}{2} [P(x_j^i/A) - P(x_j^i/B)], \quad (1)$$

где $D(x_j^i)$ – диагностический коэффициент признака j , изменяющийся в пределах интервала i и определяемый как отношение десятичного логарифма частоты группы скважин с высокопродуктивным боковым стволом ($P(x_j^i/A)$) к частоте группы скважин с низкопродуктивным боковым стволом ($P(x_j^i/B)$).

Результаты работы

В таблице 2 отражены наиболее информативные критерии для шести групп скважин с боковыми стволами, выделенных в результате проведения дискриминантного анализа. Граничное значение $I(x_j^i)$, при котором критерий считается информативным, составляет 0,5 и получено в результате обобщения данных моделирования, в том числе проведенного в различных тектонико-стратиграфических условиях разработки залежей.

Таблица 2 / Table 2

**Информативность параметров для групп скважин с боковым стволом /
Parameter informativeness for groups of wells with sidetrack**

Номер группы / Group number	Параметры/ Parameters	Информативность параметра/ Informative value of the parameter
1	$K_{\text{прод}}/K_{\text{prod}}$	1,57
	$K_{\text{н}}/K_{\text{o}}$	2,03
	m	0,81
	W_1	1,45
	Q_2	0,77
	Q_3	0,94

2	K_{npod} / K_{prod}	0,57
	$P_{пл} / P_{res}$	2,22
	$H_{зал} / H_{res}$	0,74
	K_{np} / K_{perm}	1,6
	μ_1	2,34
	Q_1	0,55
3	H_3 / H_{eff}	1,5
	$H_{зал} / H_{res}$	1,93
	$K_H K_H / K_o$	0,77
	μ_2	1,06
	Q_1	1,25
	Q_3	1,74
4	K_{npod} / K_{prod}	1,65
	$P_{пл} / P_{res}$	2,09
	H_3 / H_{eff}	2,17
	H_1	0,86
	K_{np} / K_{perm}	0,54
	μ_1	1,22
5	$P_{пл} / P_{res}$	1,35
	H_1	1,06
	$H_{зал} / H_{res}$	2,04
	K_{npod} / K_{prod}	1,99
	m	2,87
	W_1	0,73
	Q_2	1,4

6	H_z / H_{eff}	1,3
	$H_{\text{зал}} / H_{\text{res}}$	2,4
	$K_{\text{прод}} / K_{\text{prod}}$	0,53
	μ_1	0,90
	ρ_1	0,88
	Q_3	2,31

Для каждой группы объектов определен перечень информативных параметров, которые оказывают в той или иной мере влияние на эффективность зарезки боковых стволов. По скважинам первой группы результативность ЗБС в большей степени зависит от коэффициента продуктивности, нефтенасыщенности и обводненности, а в меньшей – от текущего дебита нефти. Несмотря на повышенные значения вязкости добываемой продукции, которые характерны для объектов турнейского яруса, в пластовых условиях не происходит интенсивного выпадения и насыщения пористой среды асфальтенами и смолами, на что указывает минимальное время выхода скважин на максимальный оптимальный дебит после освоения. Иной тренд идентифицирован по скважинам второй группы, где наибольшее влияние оказывают вязкость нефти и пластовое давление при минимально допустимом значении информативности для коэффициента продуктивности. Наличие естественной трещиноватости в данном случае оказывает большее влияние на результативность зарезки боковых стволов по сравнению с четвертой группой скважин, где коэффициент проницаемости обладает минимальной информативностью, равной 0,54. Третья группа скважин характеризуется отсутствием коэффициента продуктивности в рассматриваемом наборе критериев, что может быть обусловлено особенностями распределения нефтенасыщенных пропластков в общей толщине пласта. На это также указывают высокие значения информативности глубины залегания залежи, эффективной нефтенасыщенной толщины и показателя накопленной добычи нефти. Влияние фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов на эффективность зарезки боковых стволов в данном случае минимально, так как объекты данной группы характеризуются благоприятными геолого-технологическими условиями залегания продуктивных пластов, которые выражены в виде отсутствия послойной неоднородности и невязанных трещин. По объектам пятой и шестой групп также прослеживается отсутствие коэффициента продуктивности в качестве информативного критерия, при этом значительно различается по количественным характеристикам набор параметров, которые влияют на эффективность ЗБС. Так, для пятой группы объектов установлено, что низкие коллекторские свойства пластов являются первостепенной причиной низкой выработки запасов нефти и обуславливают наличие остаточных ресурсов, освоение которых возможно при помощи проводки дополнительного ствола. Вероятность получения дополнительной добычи нефти в данном случае зависит и от толщины пласта, но опыт разработки залежей рассматриваемых тектонико-стратиграфических элементов демонстрирует отсутствие явной взаимосвязи данного параметра с показателем продуктивности. По шестой группе объектов информативность вязкости и плотности нефти выше по сравнению с коэффициентом проницаемости, что объясняется кольматацией призабойной зоны в результате интенсивного отбора запасов высоковязкой нефти при

пониженных давлениях в зоне дренажа. На это также указывает превалирующая информативность параметра накопленной добычи нефти.

В целях возможности оперативной оценки эффективности зарезки боковых стволов получены модели для ретроспективной оценки результативности реализации данной технологии, где в качестве функции выступает величина абсолютного прироста дебита нефти, рассчитываемая по формуле:

$$q = q_2 - q_1, \quad (2)$$

где q_2 — накопленный объем добычи нефти за 12 месяцев эксплуатации скважины с боковым стволом;

q_1 — накопленный объем добычи нефти за 12 месяцев эксплуатации скважины без бокового ствола, определяемый по базовым зависимостям или кривым Арпса.

Аргументами в моделях прогнозирования являются наиболее информативные параметры, установленные ранее. Исходя из этого, по полученным зависимостям можно не только определять интервалы изменения параметров, при которых эффективность зарезки боковых стволов будет максимальна, но и надежно идентифицировать их направления влияния на величину абсолютного прироста дебита нефти. Модели, полученные для шести групп объектов, имеют следующий вид (3)–(8):

- по объектам первой группы:

$$q = -0,54K_{\text{прод}} + 0,27K_{\text{н}} - 0,12m + 0,44W_1 - 0,3Q_2 - 0,76Q_3; \quad (3)$$

- по объектам второй группы:

$$q = 0,82K_{\text{прод}} - 0,39P_{\text{пл}} + 0,85H_{\text{зал}} - 0,7K_{\text{пр}} + 0,45\mu_1 - 0,07Q_1; \quad (4)$$

- по объектам третьей группы:

$$q = -0,38H_9 + 0,58H_{\text{зал}} + 0,14K_{\text{н}} - 0,63\mu_2 + 0,84Q_1 - 0,35Q_3; \quad (5)$$

- по объектам четвертой группы:

$$q = -0,11K_{\text{прод}} + 0,9P_{\text{пл}} - 0,2H_9 + 0,5H_1 - 0,19K_{\text{пр}} + 0,3\mu_1; \quad (6)$$

- по объектам пятой группы:

$$q = -0,3P_{\text{пл}} + 0,17H_1 + 0,2H_{\text{зал}} - 0,12K_{\text{пр}} + 0,57m - 0,27W_1 + 0,51Q_2; \quad (7)$$

- по объектам шестой группы:

$$q = -0,16H_9 - 0,52H_{\text{зал}} + 0,76K_{\text{пр}} - 0,05\mu_1 + 0,26\rho_1 - 0,77Q_3. \quad (8)$$

Полученные модели могут быть интерпретированы в единой плоскости исследования без необходимости привлечения сторонних программно-аппаратных комплексов, что показывает эффективность реализации данного подхода. Помимо этого, возможно и сопоставление данных моделей между собой. Например, для объектов пятой и шестой групп наблюдается разнонаправленное влияние глубины залегания залежей на показатель величины абсолютного прироста дебита нефти. Дополнительно, дифференцированно по группам объектов могут быть косвенно определены критерии для планирования и проведения наиболее эффективных операций по зарезке боковых стволов. Так, для залежей, приуроченных к четвертой группе, наибольшая эффективность ЗБС характерна в случае низких значений продуктивности, эффективной нефтенасыщенной толщины и проницаемости.

Необходимость валидации полученных результатов на дополнительной выборке данных отсутствует в силу того, что коэффициенты множественной корреляции зависимостей варьируются от 0,754 до 0,856 при среднем значении относительной погрешности, равном 11,7 %. Отметим, что отсутствие параметра продуктивности в моделях приводит к отрицательному влиянию технологических показателей, косвенно характеризующих потенциально возможный объем извлекаемых запасов нефти, на абсолютный прирост дебита нефти после зарезки боковых стволов. Эффективность ЗБСкратно уменьшается при положительном влиянии коэффициента продуктивно-

сти и вязкости нефти, что может быть обусловлено увеличением фильтрационных сопротивлений, препятствующих созданию оптимальных условий для извлечения остаточных запасов.

Выводы

Таким образом, в результате проведения исследований получены следующие выводы:

- зарезка боковых стволов относится к одному из актуальных методов увеличения производительности скважин, позволяющих увеличить радиус зоны дренажа и повысить рентабельность ввода в промышленную эксплуатацию низкопродуктивных объектов;

- несмотря на наличие различных алгоритмов и методик для выбора скважин-кандидатов, их релевантность варьируется в широких пределах, что оказывает влияние на эффективность принятия управленческих решений;

- дифференциация и группирование объектов способствует снижению уровня неопределенности и возможности идентификации скрытых закономерностей изменения геолого-промысловых параметров;

- разработанные научно-методические основы выбора скважин-кандидатов для зарезки боковых стволов при помощи комплексирования методов распознавания образов позволяют в условиях неоднородности и неравновесности данных формировать количественно-качественную характеристику критериев, влияющих на эффективность технологической операции.

Полученные модели за счет их высокой адаптивности к геолого-промысловым условиям могут быть успешно использованы в решении задач разработки нефтяных месторождений, приуроченных к различным тектонико-стратиграфическим элементам.

Литература

1. Ахметов Р.Т., Кулешова Л.С., Велиев Э.Ф., Мухаметшин В.В., Сафиуллина А.Р. Обоснование аналитической модели гидравлической извилистости поровых каналов коллекторов Западной Сибири на основе капиллярных исследований // Известия Томского политехнического университета. – 2022. – Т. 333. № 7. – С. 86–95. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3587.
2. Баталов С.А., Андреев В.Е., Мухаметшин В.В., Лобанков В.М., Кулешова Л.С. Применение резонансных функций при оценке параметров межскважинных зон // Записки Горного института. – 2022. – Т. 257. – С. 755–763. DOI: 10.31897/PMI.2022.85.
3. Гилязетдинов Р.А., Кулешова Л.С., Мухаметшин В.Ш., Якупов Р.Ф., Гиззатуллина А.А., Сагитова З.Н. Комплексный подход к прогнозированию результатов идентификации залежей в условиях различной тектонической приуроченности объектов // SOCAR Proceedings. – 2023. – № 4. – С. 31–41. DOI: 10.5510/OGP20230400913.
4. Зайцев Р.А., Распопов А.В. Опыт разработки месторождений Пермского края горизонтальными скважинами // Пермский журнал нефтегазового и горного дела. – 2020. – Т. 20. № 2. – С. 182–191. DOI: 10.15593/2224-9923/2020.2.8.
5. 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. 137–150. DOI: 10.46698/h5492-0913-2863-p.
6. Мухаметшин В.В., Кулешова Л.С. Алгоритм обоснования выбора объектов для внедрения инновационных технологий добычи нефти в условиях нижнемеловых отложений Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета // Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. № 10. – С. 179–186. DOI: 10.18799/24131830/2023/10/4123.
7. Хузин Р.Р., Андреев В.Е., Мухаметшин В.В., Кулешова Л.С., Дубинский Г.С., Сафиуллина А.Р. Влияние гидравлического сжатия на пористо-проницаемые свойства коллекторов // Записки Горного института. – 2021. – Т. 251. № 3. – С. 688–697. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.8.

8. Abdullayeva F., Imamverdiyev Y. Development of oil production forecasting method based on deep learning // *Statistics, Optimization and Information Computing*. – 2019. – Vol. 7. Issue 4. – pp. 826–39. DOI: 10.19139/soic-2310-5070-651.
9. Bayamirova R., Togasheva A., Saduakasov D., Zholbasarova A., Tabylganov M., Gusmanova A., Nugumarov S. Reservoir development and well operation control methods: practical application // *Processes*. – 2025. – Vol. 13. Issue 5. – Art. No. 1541. DOI: 10.3390/pr13051541.
10. Belhaj A.F., Elraies K.A., Alnarabiji M.S., Kareem F.A.A., Shuhli J.A., Mahmood S.M., Belhaj H. Experimental investigation, binary modelling and artificial neural network prediction of surfactant adsorption for enhanced oil recovery application // *Chemical Engineering Journal*. – 2021. – Vol. 406. – Art. No. 127081. DOI: 10.1016/j.ccej.2020.127081.
11. Belhaj A.F., Elraies K.A., Mahmood S.M., Zulkifli N.N., Akbari S., Hussien O.S. The effect of surfactant concentration, salinity, temperature, and pH on surfactant adsorption for chemical enhanced oil recovery: a review // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2020. – Vol. 10. Issue 1. – pp. 125–37. DOI: 10.1007/s13202-019-0685-y.
12. Chen X., Patel V., Liu J., Liu S. Surfactant synergy on rheological properties, injectivity, and enhanced oil recovery of viscoelastic polymers // *Physics of Fluids*. – 2025. – Vol. 37. Issue 2. DOI: 10.1063/5.0252754.
13. Du J., Zheng J., Liang Y., Ma Y., Wang B., Liao Q., Shahzad K. A deep learning-based approach for predicting oil production: A case study in the United States. // *Energy*. – 2024. – Vol. 288. – Art. No. 129688. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129688.
14. Gbadamosi A.O., Junin R., Manan M.A., Agi A., Yusuff A.S. An overview of chemical enhanced oil recovery: recent advances and prospects // *International Nano Letters*. – 2019. – Vol. 9. Issue 3. – pp. 171–202. DOI: 10.1007/s40089-019-0272-8.
15. Gilyazetdinov R.A., Mukhametshin V.Sh., Gizzatullina A.A., Kochanov E.M., Samigullina L.Z., Stepanova R.R., Akhmetianova L.B., Bagmanov R.N. Development and adaptation of hybrid algorithms for assessing the degree of well interaction. *SOCAR Proceedings*. 2024. No. 1. pp. 70–75. DOI: 10.5510/OGP20240100942.
16. Ibatullin R.R., Ibragimov N.G., Khisamov R.S., Zaripov A.T. Problems and solutions for shallow heavy oil production. In: *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. SPE, 2012. – p. SPE-161998. DOI: 10.2118/161998-MS.
17. Madani M., Zargar G., Takassi M.A., Daryasafar A., Wood D.A., Zhang Z. Fundamental investigation of an environmentally-friendly surfactant agent for chemical enhanced oil recovery // *Fuel*. – 2019. – Vol. 238. – pp. 186–97. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.10.105.
18. Meshalkin V., Asadullin R., Vezhnin S., Voloshin A., Gallyamova R., Deryaev A., Dokichev V. et al. Engineering and technological approaches to well killing in hydrophilic formations with simultaneous oil production enhancement and water shutoff using selective polymer-inorganic composites // *Energies*. – 2025. – Vol. 18. – Art. No. 4721. DOI: 10.3390/en18174721.
19. Negin C., Ali S., Xie Q. Most common surfactants employed in chemical enhanced oil recovery // *Petroleum*. – 2017. – Vol. 3. Issue 2. – pp. 197–211. DOI: 10.1016/j.petlm.2016.11.007.
20. Ning Y., Kazemi H., Tahmasebi P. A comparative machine learning study for time series oil production forecasting: ARIMA, LSTM, and Prophet // *Computers and Geosciences*. – 2022. – Vol. 164. – Art. No. 105126. DOI: 10.1016/j.cageo.2022.105126.
21. Ogbu A.D., Iwe K.A., Ozowe W., Ikevuje A.H. Advances in machine learning-driven pore pressure prediction in complex geological settings // *Computer Science and IT Research Journal*. – 2024. – Vol. 5. Issue 7. – pp. 1648–65. DOI: 10.51594/csitrj.v5i7.1350.
22. Oryngozhin Y.S., Moldabayeva G.Z., Igembayev I.B. Innovative method of high-viscosity oil production // In: *Int Multidiscip Sci GeoConference SGEM*. – 2012. – Vol. 2. – pp. 463–470.
23. Qu J., Tang Z., Lei G., Wu Q., Liao Q., Ning F. A novel threshold pressure gradient model and its influence on production simulation for shale oil reservoirs // *Energy Fuels*. – 2024. – Vol. 38. Issue 13. – pp. 11644–11661. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c00320.
24. Saduakasov D.S., Zholbasarova A.T., Bayamirova R.U., Togasheva A.R., Tabylganov M.T., Sarbopeeveva M.D., Telin A.G. Well killing with absorption control // *Journal of Mining Institute*. – 2025. – Vol. 272. – pp. 119–35.
25. Salem K.G., Salem A.M., Tantawy M.A., Gawish A.A., Gomaa S., El-Hoshoudy A.N. A comprehensive investigation of nanocomposite polymer flooding at reservoir conditions: new

insights into enhanced oil recovery // *Journal of Polymers and the Environment*. – 2024. – Vol. 32. Issue 11. – pp. 5915–35. DOI: 10.1007/s10924-024-03336-z.

26. Tadjer A., Hong A., Bratvold R.B. Machine learning based decline curve analysis for short-term oil production forecast // *Energy Exploration and Exploitation*. – 2021. – Vol. 39. Issue 5. – pp. 1747–1769. DOI: 10.1177/01445987211011.

27. Ye Z., Jin C., Pang Y. Research on optimizing the drilling rate for through-tubing drilling and sand pumping tools // *Petroleum Science and Technology*. – 2025. – Vol. 43. Issue 16. – pp. 1987–2006. DOI: 10.1080/10916466.2024.2377749.

28. Yusuf A., Bhatti M.M., Khalique C.M. Computational study of the thermophysical properties of graphene oxide/vacuum residue nanofluids for enhanced oil recovery // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2025. – Vol. 150. Issue 1. – pp. 771–83. DOI: 10.1007/s10973-024-13921-y.

References

1. Akhmetov R.T., Kuleshova L.S., Veliyev E.F., Mukhametshin V.V., Safiullina A.R. Substantiation of an analytical model of reservoir pore channels hydraulic tortuosity in Western Siberia based on capillary research data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022. Vol. 333. No. 7. pp. 86–95. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3587. (In Russ.)

2. Batalov S.A., Andreev V.E., Mukhametshin V.V., Lobankov V.M., Kuleshova L.S. Application of resonance functions in estimating the parameters of interwell zones. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. pp. 755–63. DOI: 10.31897/PMI.2022.85. (In Russ.)

3. Gilyazetdinov R.A., Kuleshova L.S., Mukhametshin V.Sh., Yakupov R.F., Gizzatullina A.A., Sagitova Z.N. An integrated approach to predicting the results of the identification of deposits in conditions of different tectonic confinement of objects. *SOCAR Proceedings*. 2023. No. 4. pp. 31–41. DOI: 10.5510/OGP20230400913. (In Russ.)

4. Zaitcev R.A., Raspopov A.V. Experience of oilfield development in Perm Krai using horizontal wells. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2020. Vol. 20. No. 2. pp. 182–191. DOI: 10.15593/2224-9923/2020.2.8. (In Russ.)

5. 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. 137–150. DOI: 10.46698/h5492-0913-2863-p. (In Russ.)

6. Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S. Algorithm for substantiating facilities selection for introduction of oil production innovative technologies in the conditions of the lower Cretaceous deposits of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023 Vol. 334. No. 10. pp. 179–86. DOI: 10.18799/24131830/2023/10/4123. (In Russ.)

7. Khuzin R.R., Andreev V.E., Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S., Dubinskiy G.S., Safiullina A.R. Influence of hydraulic compression on porosity and permeability properties of reservoirs. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 251. No. 3. pp. 688–697. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.8. (In Russ.)

8. Abdullayeva F., Imamverdiyev Y. Development of oil production forecasting method based on deep learning. *Statistics, Optimization and Information Computing*. 2019. Vol. 7. Issue 4. pp. 826–39. DOI: 10.19139/soic-2310-5070-651.

9. Bayamirova R., Togasheva A., Saduakasov D., Zholbasarova A., Tabylganov M., Gusmanova A., Nugumarov S. Reservoir development and well operation control methods: practical application. *Processes*. 2025. Vol. 13. Issue 5. Art. No. 1541. DOI: 10.3390/pr13051541.

10. Belhaj A.F., Elraies K.A., Alnarabiji M.S., Kareem F.A.A., Shuhli J.A., Mahmood S.M., Belhaj H. Experimental investigation, binary modelling and artificial neural network prediction of surfactant adsorption for enhanced oil recovery application. *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 406. Art. No. 127081. DOI: 10.1016/j.cej.2020.127081.

11. Belhaj A.F., Elraies K.A., Mahmood S.M., Zulkifli N.N., Akbari S., Hussien O.S. The effect of surfactant concentration, salinity, temperature, and pH on surfactant adsorption for chemical enhanced oil recovery: a review. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2020. Vol. 10. Issue 1. pp. 125–37. DOI: 10.1007/s13202-019-0685-y.

12. Chen X., Patel V., Liu J., Liu S. Surfactant synergy on rheological properties, injectivity, and enhanced oil recovery of viscoelastic polymers. *Physics of Fluids*. 2025. Vol. 37. Issue 2. DOI: 10.1063/5.0252754.
13. Du J., Zheng J., Liang Y., Ma Y., Wang B., Liao Q., Shahzad K. A deep learning-based approach for predicting oil production: A case study in the United States. *Energy*. 2024. Vol. 288. Art. No. 129688. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129688.
14. Gbadamosi A.O., Junin R., Manan M.A., Agi A., Yusuff A.S. An overview of chemical enhanced oil recovery: recent advances and prospects. *International Nano Letters*. 2019. Vol. 9. Issue 3. pp. 171–202. DOI: 10.1007/s40089-019-0272-8.
15. Gilyazetdinov R.A., Mukhametshin V.Sh., Gizzatullina A.A., Kochanov E.M., Samigullina L.Z., Stepanova R.R., Akhmetianova L.B., Bagmanov R.N. Development and adaptation of hybrid algorithms for assessing the degree of well interaction. *SOCAR Proceedings*. 2024. No. 1. pp. 70–75. DOI: 10.5510/OGP20240100942.
16. Ibatullin R.R., Ibragimov N.G., Khisamov R.S., Zaripov A.T. Problems and solutions for shallow heavy oil production. In: *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. SPE. 2012. p. SPE-161998. DOI: 10.2118/161998-MS.
17. Madani M., Zargar G., Takassi M.A., Daryasafar A., Wood D.A., Zhang Z. Fundamental investigation of an environmentally-friendly surfactant agent for chemical enhanced oil recovery. *Fuel*. 2019. Vol. 238. pp. 186–97. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.10.105.
18. Meshalkin V., Asadullin R., Vezhnin S., Voloshin A., Gallyamova R., Deryaev A., Dokichev V. et al. Engineering and technological approaches to well killing in hydrophilic formations with simultaneous oil production enhancement and water shutoff using selective polymer-inorganic composites. *Energies*. 2025. Vol. 18. Art. No. 4721. DOI: 10.3390/en18174721.
19. Negin C., Ali S., Xie Q. Most common surfactants employed in chemical enhanced oil recovery. *Petroleum*. 2017. Vol. 3. Issue 2. pp. 197–211. DOI: 10.1016/j.petlm.2016.11.007.
20. Ning Y., Kazemi H., Tahmasebi P. A comparative machine learning study for time series oil production forecasting: ARIMA, LSTM, and Prophet. *Computers and Geosciences*. 2022. Vol. 164. Art. No. 105126. DOI: 10.1016/j.cageo.2022.105126.
21. Ogbu A.D., Iwe K.A., Ozowe W., Ikevuje A.H. Advances in machine learning-driven pore pressure prediction in complex geological settings. *Computer Science and IT Research Journal*. 2024. Vol. 5. Issue 7. pp. 1648–65. DOI: 10.51594/csitrj.v5i7.1350.
22. Oryngozhin Y.S., Moldabayeva G.Z., Igembayev I.B. Innovative method of high-viscosity oil production. In: *Int Multidiscip Sci GeoConference SGEM*. 2012. Vol. 2. pp. 463–470.
23. Qu J., Tang Z., Lei G., Wu Q., Liao Q., Ning F. A novel threshold pressure gradient model and its influence on production simulation for shale oil reservoirs. *Energy Fuels*. 2024. Vol. 38. Issue 13. pp. 11644–11661. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c00320.
24. Saduakasov D.S., Zholbasarova A.T., Bayamirova R.U., Togasheva A.R., Tabylganov M.T., Sarbopeeveva M.D., Telin A.G. Well killing with absorption control. *Journal of Mining Institute*. 2025. Vol. 272. pp. 119–35.
25. Salem K.G., Salem A.M., Tantawy M.A., Gawish A.A., Gomaa S., El-Hoshoudy A.N. A comprehensive investigation of nanocomposite polymer flooding at reservoir conditions: new insights into enhanced oil recovery. *Journal of Polymers and the Environment*. 2024. Vol. 32. Issue 11. pp. 5915–35. DOI: 10.1007/s10924-024-03336-z.
26. Tadjer A., Hong A., Bratvold R.B. Machine learning based decline curve analysis for short-term oil production forecast. *Energy Exploration and Exploitation*. 2021. Vol. 39. Issue 5. pp. 1747–1769. DOI: 10.1177/01445987211011.
27. Ye Z., Jin C., Pang Y. Research on optimizing the drilling rate for through-tubing drilling and sand pumping tools. *Petroleum Science and Technology*. 2025. Vol. 43. Issue 16. pp. 1987–2006. DOI: 10.1080/10916466.2024.2377749.
28. Yusuf A., Bhatti M.M., Khaliq C.M. Computational study of the thermophysical properties of graphene oxide/vacuum residue nanofluids for enhanced oil recovery. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2025. Vol. 150. Issue 1. pp. 771–83. DOI: 10.1007/s10973-024-13921-y.

УДК 550.8.013

DOI: 10.46698/VNC.2026.84.45.001

Оригинальная статья

Оценка перспектив нефтегазоносности среднемиоценовых отложений западной акватории Среднего Каспия на основе бассейнового анализа

Д.В. Соколов

ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Россия, 129110, г. Москва,
ул. Щепкина, 61/2, стр. 12, e-mail: Denis.Sokolov@lukoil.com

Статья поступила: 20.03.2026, доработана: 10.06.2026, принята к публикации: 12.06.2026

Резюме: Актуальность работы. Среднемиоценовый (караганско-чокракский) комплекс западной части акватории Среднего Каспия остаётся существенно менее изученным по сравнению с одновозрастными отложениями прилегающей суши и мезозойскими горизонтами акватории, несмотря на доказанную нефтегазоносность данного стратиграфического интервала в регионе, что обуславливает необходимость его комплексного изучения. **Цель работы** – комплексная оценка нефтегазоносности среднемиоценовых отложений западной части акватории Среднего Каспия, включая установление закономерностей формирования и пространственного распределения углеводородных залежей, а также локализацию очагов генерации углеводородов в мезо-кайнозойском осадочном комплексе по данным бассейнового моделирования. **Материалы и методы.** В основу исследования положен комплекс геолого-геофизических данных: интерпретация сейсмических профилей МОГТ-2D суммарной длиной около 18 000 пог. км, скважинные данные, а также опубликованные и фондовые геологические, геофизические, геохимические и промысловые материалы. Проведено двумерное бассейновое моделирование системы композитных профилей, пересекающих зону перехода суша-акватория. **Результаты.** По результатам бассейнового моделирования определены контуры очагов генерации углеводородов для основных нефтегазоматеринских толщ (НГМТ), восстановлена история тепловой эволюции региона и установлены вероятные направления миграции флюидов. Наибольшая катагенетическая зрелость НГМТ приурочена к осевой части Сулакской впадины. Мезозойские НГМТ (за исключением триасовых) сохраняют генерационный потенциал в современных условиях; кайнозойские НГМТ (за исключением караганской) вошли в главное окно нефтегенерации. **Научная новизна** работы состоит в дифференцированной оценке генерационного потенциала основных НГМТ мезо-кайнозойского комплекса, уточнении контуров очагов генерации углеводородов и прогнозном картировании зон распространения перспективных объектов различного типа в среднемиоценовых отложениях западной акватории Среднего Каспия. **Выводы.** Западная часть акватории Среднего Каспия располагает необходимой совокупностью условий для формирования углеводородных залежей различного типа. Приоритетными объектами поиска в среднемиоценовом комплексе являются литологически и тектонически экранированные ловушки в чокракских и караганских отложениях.

Ключевые слова: Средний Каспий, среднемиоценовые отложения, неантиклинальные ловушки, углеводородные системы, бассейновое моделирование, нефтегазоматеринские толщи, Терско-Каспийский прогиб.

Для цитирования: Соколов Д.В. Оценка перспектив нефтегазоносности среднемиоценовых отложений западной акватории Среднего Каспия на основе бассейнового анализа. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 173–185. DOI: 10.46698/VNC.2026.84.45.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.84.45.001

Original paper

Assessment of hydrocarbon potential of the middle miocene deposits in the Western Middle Caspian Sea based on basin modeling

D.V. Sokolov 

LLC "LUKOIL-Engineering", 61/2 Shchepkina Str., Moscow 129110,
Russian Federation, e-mail: Denis.Sokolov@lukoil.com

Received: 20.03.2026, revised: 10.06.2026, accepted: 12.06.2026

Abstract: Relevance. The Middle Miocene (Karagan-Chokrak) complex in the western offshore area of the Middle Caspian remains significantly less studied than the coeval onshore deposits and the offshore Mesozoic horizons. Meanwhile, the hydrocarbon potential of this stratigraphic interval in the region has already been proven. This discrepancy underscores the urgent need for its comprehensive study. **Aim.** The aim of this work is a comprehensive assessment of the petroleum potential of the Middle Miocene deposits in the western Middle Caspian Sea, including the identification of patterns governing the formation and spatial distribution of hydrocarbon accumulations, as well as the localization of generation sources within the Meso-Cenozoic sedimentary succession based on basin modeling. **Materials and Methods.** The study integrates approximately 18,000 line-km of 2D CDP seismic data, well logs, and published and archival geological, geophysical, geochemical, and field production materials. Two-dimensional basin modeling along composite onshore–offshore cross-sections was performed using PetroMod software. **Results.** Modeling results define the boundaries of hydrocarbon generation sources for the principal source rock intervals (SRI), reconstruct the regional thermal evolution history, and delineate probable fluid migration pathways. The highest catagenetic maturity is associated with the axial zone of the Sulak Depression (Dagestan, Russia). Mesozoic source rocks (except Triassic) retain their generative potential under present-day conditions; Cenozoic source rocks (except Karaganian) have entered the main oil generation window. **The scientific novelty** of the study lies in the differentiated assessment of the generative potential of the principal Meso-Cenozoic SRI, the refinement of generation kitchen boundaries, and the predictive mapping of prospective target zones of various trap types within the Middle Miocene deposits of the western Middle Caspian offshore. **Conclusions.** The western Middle Caspian offshore possesses all essential geological conditions for the formation of hydrocarbon accumulations of various types. Priority exploration targets within the Middle Miocene succession are lithologically and tectonically sealed traps in the Chokrakian and Karaganian deposits.

Keywords: Western Middle Caspian offshore; Middle Miocene deposits; tectonically and lithologically sealed traps; petroleum systems; basin modeling; source rocks; Terek–Caspian Trough.

For citation: Sokolov D.V. Assessment of hydrocarbon potential of the middle miocene deposits in the Western Middle Caspian Sea based on basin modeling. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 173–185. DOI: 10.46698/VNC.2026.84.45.001

Введение

Западная часть акватории Среднего Каспия в пределах дагестанского сектора шельфа рассматривается как перспективный район для поисков и разведки углеводородов. Актуальность её изучения определяется необходимостью расширения ресурсной базы региона, одним из источников которой может служить кайнозойский нефтегазоносный комплекс, в том числе среднемиоценовый (карагано-чокракский), степень изученности которого в акватории значительно уступает мезозойским от-

ложениям. Перспективность данного комплекса подтверждается промышленной нефтегазоносностью смежных районов Восточного Предкавказья, а также установленной продуктивностью чокракских отложений на месторождении Инчхе-море в пределах дагестанского шельфа.

Среднемиоценовые отложения занимают важное место в истории изучения нефтегазоносности региона. Многочисленные естественные нефтепроявления в этих отложениях обусловили их раннее вовлечение в поисково-разведочные работы; чокракский горизонт длительное время являлся одним из приоритетных объектов разведки в Восточном Предкавказье [Шарафутдинов, Соколов, 2022]. Выявление промышленных залежей углеводородов в мезозойских отложениях акватории Каспийского моря определило вектор последующих геологоразведочных работ в направлении более глубоких горизонтов осадочного чехла. Вместе с тем карагано-чокракский интервал не утратил своей поисковой значимости: доказанная нефтегазоносность одновозрастных отложений на прилегающей суше и недостаточная изученность акваториальной части свидетельствуют о его существенном нереализованном потенциале.

Оценка перспектив нефтегазоносности среднемиоценовых отложений дагестанского шельфа и западной акватории Среднего Каспия основана на региональных закономерностях формирования и размещения углеводородных залежей, выявленных по данным аналогов с прилегающей суши, с учетом специфики геологического строения акваториальной части бассейна.

Региональные исследования среднемиоценового комплекса в области стратиграфии, литологии, тектоники, палеогеографии и нефтегазоносности отражены в работах В.Д. Голубятникова, И.О. Брода, Н.Б. Вассоевича, А.Б. Быдтаева, Б.П. Жижченко, О.К. Леонтьева, Г.Д. Буторина, Н.Я. Кунина, С.С. Косовой, Н.И. Немцова, Ф.Г. Шарафутдинова, Д.Ш. Шапиева, А.В. Скоробогатько, Р.М. Алиева и ряда других исследователей. Прогностический характер перспектив акваториальной части был обозначен ещё в середине XX века. Н.Б. Вассоевич в своей работе писал: «В отношении коллекторов в чокракской толще, залегающей в недрах под водами Каспия, дело будет обстоять исключительно хорошо. Песчанистость толщи явно увеличивается в восточном и северо-восточном направлении. И где-то восточнее Дузлака и Дербента в море должны появиться песчаники в нижнем чокраке, таящие в себе сотни тысяч тонн нефти» [Булач, Вассоевич, 1953].

На современном этапе прирост ресурсной базы региона в значительной мере связывается с выявлением неантиклинальных ловушек – литологических, стратиграфических и тектонически экранированных. Прогноз данных типов объектов относится к числу наиболее сложных задач нефтегазовой геологии и требует комплексной интерпретации сейсмических, скважинных, геохимических и петрофизических данных. Мировой опыт поисково-разведочных работ свидетельствует о том, что значительная доля новых открытий приходится именно на неантиклинальные типы ловушек.

Достигнутый уровень геолого-геофизической изученности палеоген-неогенового разреза дагестанского сектора Терско-Каспийского передового прогиба позволяет рассматривать среднемиоценовые отложения как самостоятельный перспективный объект поисков углеводородов. Цель настоящей работы состоит в комплексной оценке нефтегазоносности среднемиоценовых отложений западной части акватории Среднего Каспия, включая выявление закономерностей формирования и размещения залежей УВ, а также уточнение геометрии и генерационного потенциала очагов нефтегазообразования в мезо-кайнозойском осадочном комплексе по данным бассейнового моделирования.

Методика и материалы исследований

В основу исследования положен комплекс геолого-геофизических данных, интегрированных в единую интерпретационную модель. В качестве исходных материалов использована интерпретация сейсмических профилей МОГТ-2D порядка 18 тыс. пог. км, скважинные данные, а также опубликованные и фондовые геологические, геофизические, геохимические и промысловые материалы и личные полевые исследования. Комплексный характер исходной информации обеспечил возможность уточнения степени изученности района и реконструкции геологического строения среднемиоценового комплекса, с которым, в частности, связывается нефтегазовый потенциал западной части акватории Среднего Каспия.

Ключевым элементом методики являлось бассейновое моделирование по серии композитных профилей, «секущих» зону перехода суша–акватория, выполненное с целью реконструкции эволюции нефтегазоносной системы среднемиоценового комплекса. В рамках бассейнового моделирования была восстановлена история палеотектонического, термического и седиментационного развития бассейна, определены ключевые зоны генерации углеводородов и исследована динамика их генерации, миграции и аккумуляции в разрезе профилей.

Построение модели включало в себя следующие последовательные этапы: создание структурного каркаса с последующей его литолого-стратиграфической детализацией; выделение пород-коллекторов, флюидоупоров и НГМТ; идентификацию эрозионных этапов и перерывов в осадконакоплении; калибровку модели по скважинным данным (отражательная способность витринита R_o , температурный градиент, пластовые давления) и сведениям о фактически установленных залежах. Существенную роль в верификации модели сыграл анализ геохимических материалов, позволивший установить стратиграфическую приуроченность интервалов, обогащённых органическим веществом, оценить их генерационный потенциал и степень катагенетической преобразованности органического вещества.

В рамках настоящей работы структурный каркас региональной модели, послуживший основой для проведения бассейнового моделирования, был построен на основе структурных карт по Предгорному Дагестану и Терско-Каспийскому прогибу (Шарафутдинов Ф.Г., Буторин Г.Д., Шалбузова Л.В. и др.) и материалов по российскому сектору акватории Среднего Каспия. Обновление структурного каркаса позволило пересмотреть оценку степени катагенетического преобразования НГМТ и уточнить пространственное положение очагов генерации углеводородов для каждой выделенной материнской толщи.

Обсуждение результатов

Одним из приоритетных направлений геологоразведочных работ на нефть и газ в Терско-Каспийском нефтегазоносном бассейне (НГБ) является поиск новых залежей углеводородов в акваториальной части.

В Предгорном Дагестане основными нефтегазоносными комплексами являются: среднемиоценовый, палеоген-верхнемеловой и, в меньшей степени, нижнемеловой и юрский [Ulmishek, 2001; Керимов и др., 2014]. В акватории Каспийского моря к числу установленных нефтегазоносных комплексов относятся верхнеюрско-неокомский и альб-аптский. Несмотря на широкий стратиграфический диапазон нефтегазоносности региона, в Южном Дагестане приоритетное значение имеют два комплекса: карбонатный верхнемеловой-палеогеновый (преимущественно газоносный) и терригенный среднемиоценовый, в основном чокракский горизонт (преимущественно нефтеносный).

Выявленные залежи нефти и газа (рис. 1) локализованы в пределах Предгорного Дагестана, его шельфовой зоны (месторождения Избербаш-море, Инчхе-море), а также западной акватории Каспийского моря (Хазри, им. Р.У. Маганова, Центральное). Пространственные закономерности размещения среднемиоценовых залежей определяются спецификой геологического строения и историей тектонического развития региона, которые остаются в целом сопоставимыми для континентальной и акваториальной частей бассейна, что открывает возможность использования месторождений прилегающей суши в качестве геологических аналогов при прогнозировании нефтегазоносности среднемиоценовых отложений шельфа. При этом меньшая интенсивность позднеальпийских тектонических деформаций в пределах шельфовой зоны по сравнению с прилегающей сушей формирует дополнительное поисковое преимущество акватории: относительная тектоническая стабильность неогенового разреза создаёт более благоприятные условия для сохранности углеводородных залежей.

Наглядным подтверждением правомерности аналогового подхода служит месторождение Инчхе-море – единственный акваториальный объект, структурно и литологически сопоставимый с многопластовым месторождением Избербаш, в котором также установлены однотипные пластовые сводовые залежи в среднемиоценовых отложениях.

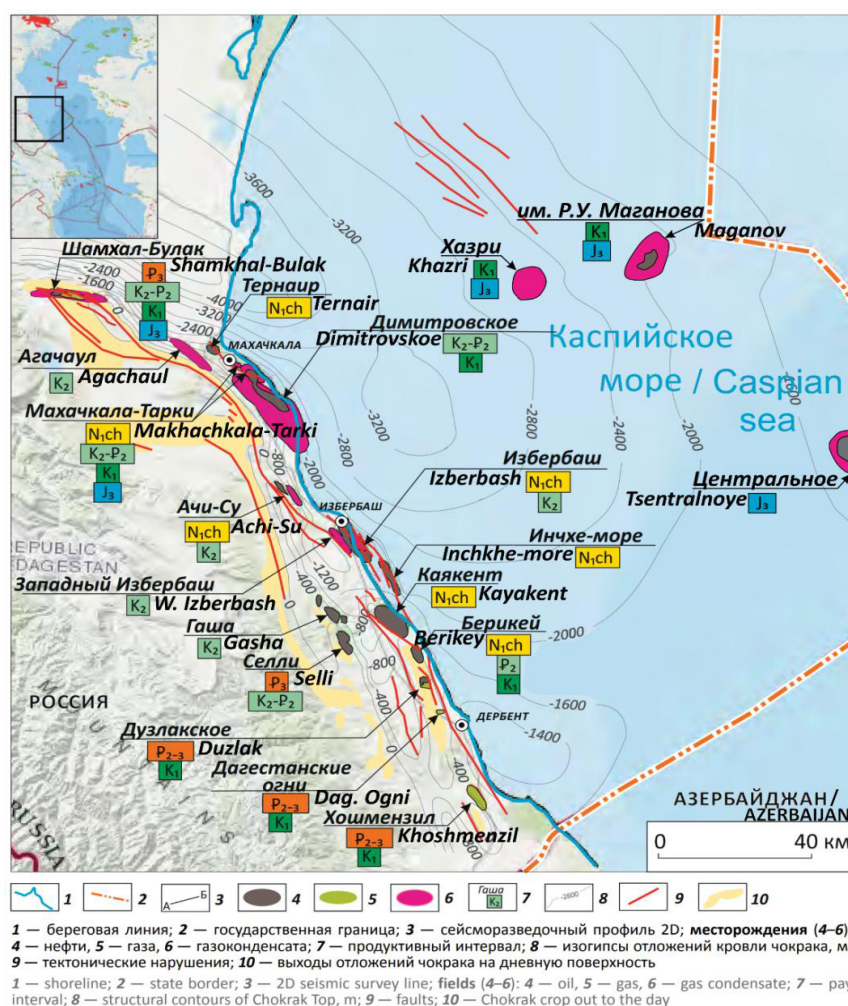


Рис. 1. Обзорная схема территории исследований с размещением залежей нефти и газа [Куницына и др., 2023] с дополнениями /

Fig. 1. Regional overview map of the study area showing the distribution of oil and gas accumulations [Kunitsyna et al., 2023], with modifications

В количественном отношении карбонатные комплексы верхнего мела и палеоцен-эоцена аккумулируют свыше 50 % суммарных запасов углеводородов по исследуемой территории, в том числе около 25 % запасов нефти и порядка 55 % запасов газа. На долю терригенного среднемиоценового комплекса приходится около 30 % суммарных запасов, из которых нефть составляет порядка 70 %, при этом в чокракских отложениях сосредоточена преобладающая их часть.

Fig. 2. Stratigraphic distribution of commercial oil and gas accumulations in the Foothill Dagestan and the western Middle Caspian offshore [Sharafutdinov et al., 1999], with modifications

Результаты комплексного анализа геолого-геофизических данных, особенностей геологического строения и тектонического развития региона, а также процессов нефтегазообразования позволяют наметить основные перспективы нефтегазоносности среднемиоценовых отложений в пределах восточной части Терско-Каспийского передового прогиба – западной акватории Среднего Каспия – на малых и умеренных глубинах. По характеру строения и механизму формирования ловушки шельфа существенно отличаются от ловушек прилегающей суши. В акватории в меньшей степени развиты структурные ловушки небольших размеров; вместе с тем значительным развитием пользуются структурно-тектонические ловушки, литологические неоднородности и стратиграфические выклинивания в миоценовых и плиоценовых отложениях. На схеме (рис. 3) показаны потенциальные объекты поисков, характерные для кайнозойской части разреза западной акватории Среднего Каспия. Дополнительно необходимо отметить перспективность отложений сармата и плиоцена, в которых установлены зоны размыва с последующим накоплением песчаного материала и литологическими замещениями.

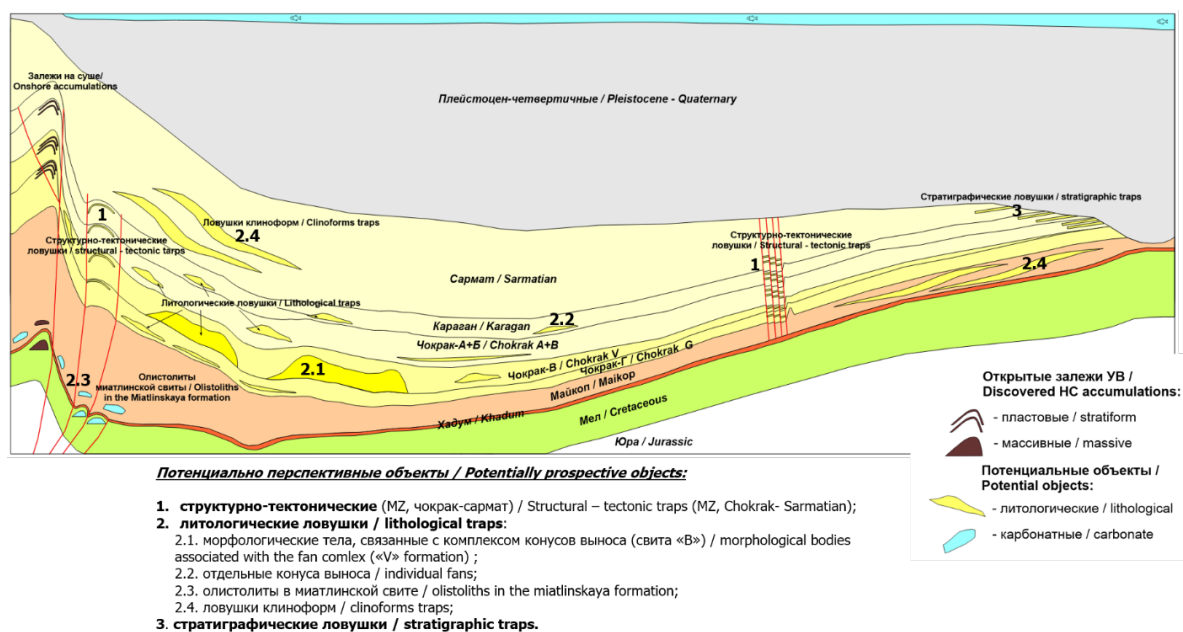


Рис. 3. Принципиальная схема перспективных объектов в кайнозойской части разреза западной акватории Среднего Каспия /

Fig. 3. Schematic diagram of prospective targets within the Cenozoic succession of the western Middle Caspian offshore

Вопрос об источниках углеводородов, поступавших в коллекторы чокракского и караганского возраста, на протяжении нескольких десятилетий остаётся дискуссионным. Н.Б. Вассоевич на основании анализа нефтеносности чокракской толщи Восточного Предкавказья пришёл к выводу об автохтонном характере содержащейся в ней нефти, то есть о её генетической связи с самой чокракской толщей [Вассоевич, 1958]. Однако результаты последующих комплексных геохимических исследований, включая биомаркерный анализ, позволили пересмотреть эту позицию. По данным биомаркерного анализа, геохимический возраст нефтей чокракских залежей восточной части Терско-Каспийского передового прогиба соответствует преимущественно мел-палеогеновому времени ($C_{28}/C_{29} > 1,0$), что указывает на их генерацию из нефтегазоматеринских толщ – альб-аптской глинистой, эоценовой глинисто-карбонатной (кумской) и олигоценовой глинистой (хадумской) [Яндарбиев и др., 2017, 2023;

Yandarbiev et al., 2021; Sachsenhofer et al., 2018]. По всей видимости, промышленные скопления углеводородов имеют полигенную природу и представляют собой смесь флюидов, генерированных различными нефтегазоматеринскими толщами в разные этапы геологической истории региона. Вместе с тем, принимая во внимание ограниченный объём биомаркерных исследований органического вещества нефтегазоматеринских отложений, однозначная идентификация источников углеводородов для кайнозойских залежей Терско-Каспийского прогиба в настоящее время не представляется возможной.

По результатам бассейнового моделирования по системе композитных профилей были уточнены контуры очагов генерации углеводородов для основных НГМТ, вероятные направления миграции флюидов и прогнозируемый фазовый состав углеводородов в пределах западной части акватории Среднего Каспия.

Основным очагом генерации углеводородов, питавшим месторождения Дагестанского клина, Восточной и Приморской антиклинальных зон, в настоящее время считается Сулакская впадина – наиболее погружённая часть Терско-Каспийского прогиба [Gavrilov et al., 2021]. Вместе с тем вклад иных очагов генерации – в частности, Южно-Дагестанской впадины и автохтонной части Предгорного Дагестана – не может быть исключён. В силу ограниченного объёма геохимических данных и структурной сложности указанных зон, данный вопрос требует дополнительного изучения.

Один из композитных профилей (рис. 4) характеризует геологическое строение региона в целом: депоцентр очага генерации – Сулакскую впадину, а также зону крутого воздымания отложений осадочного чехла в южном направлении.

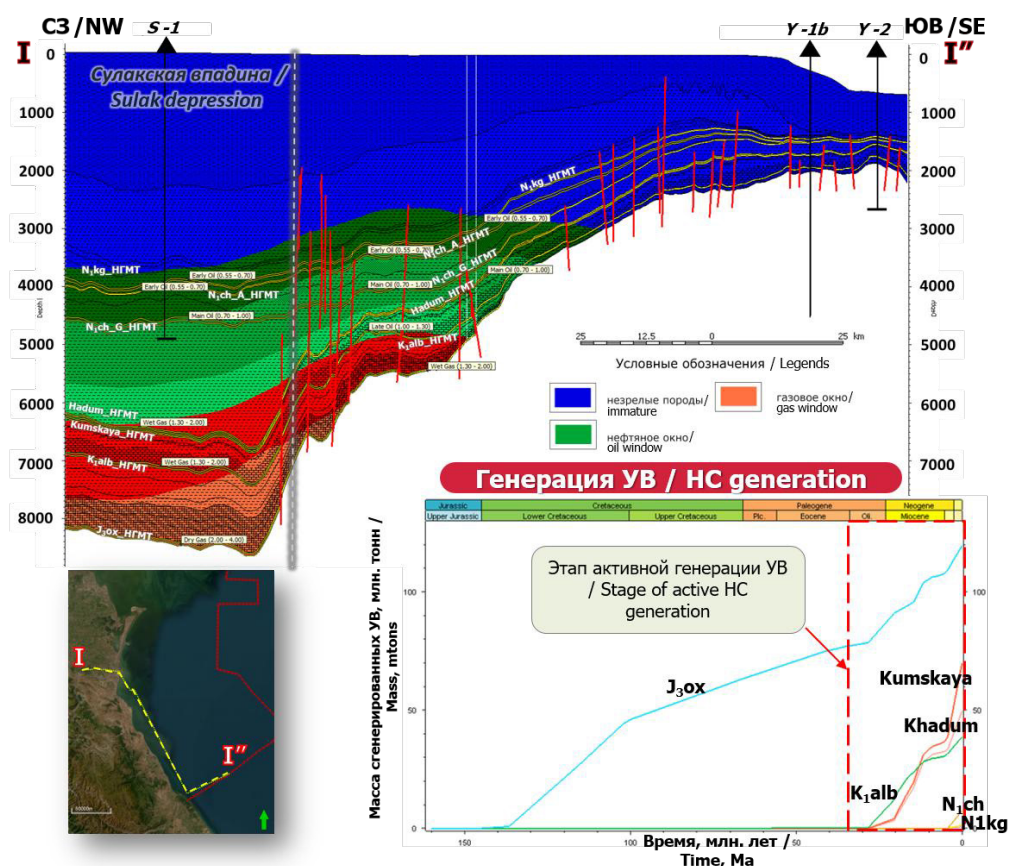


Рис. 4. Распределение степени катагенетической преобразованности НГМТ вдоль композитного 2D-профиля и график генерации УВ в мезо-кайнозойских НГМТ /

Fig. 4. Distribution of catagenetic maturity of source rock intervals (SRI) along the composite 2D cross-section and hydrocarbon generation plot for the Meso-Cenozoic SRI

Наибольшая катагенетическая зрелость НГМТ установлена в осевой части Сулакской впадины; к юго-западу она закономерно убывает в соответствии с региональным подъемом фундамента. В современных условиях мезозойские НГМТ распределены по катагенезу от состояния «незрелых пород» в юго-западной части акватории Среднего Каспия до «окна генерации сухого газа» в Сулакской впадине. Нефтегазоматеринские толщи эоцена–олигоцена (кумская и хадумская) в основном находятся в пределах «главного окна нефтегенерации», тогда как среднемиоценовые НГМТ занимают диапазон от «незрелых» до «главного окна нефтегенерации».

Наибольшими кумулятивными массами сгенерированных УВ характеризуются оксфордская, кумская и хадумская НГМТ; наименьшими – чокракская НГМТ. Согласно расчётным графикам генерации углеводородов, основные нефтегазоматеринские толщи продолжают продуцировать углеводороды в современных геологических условиях.

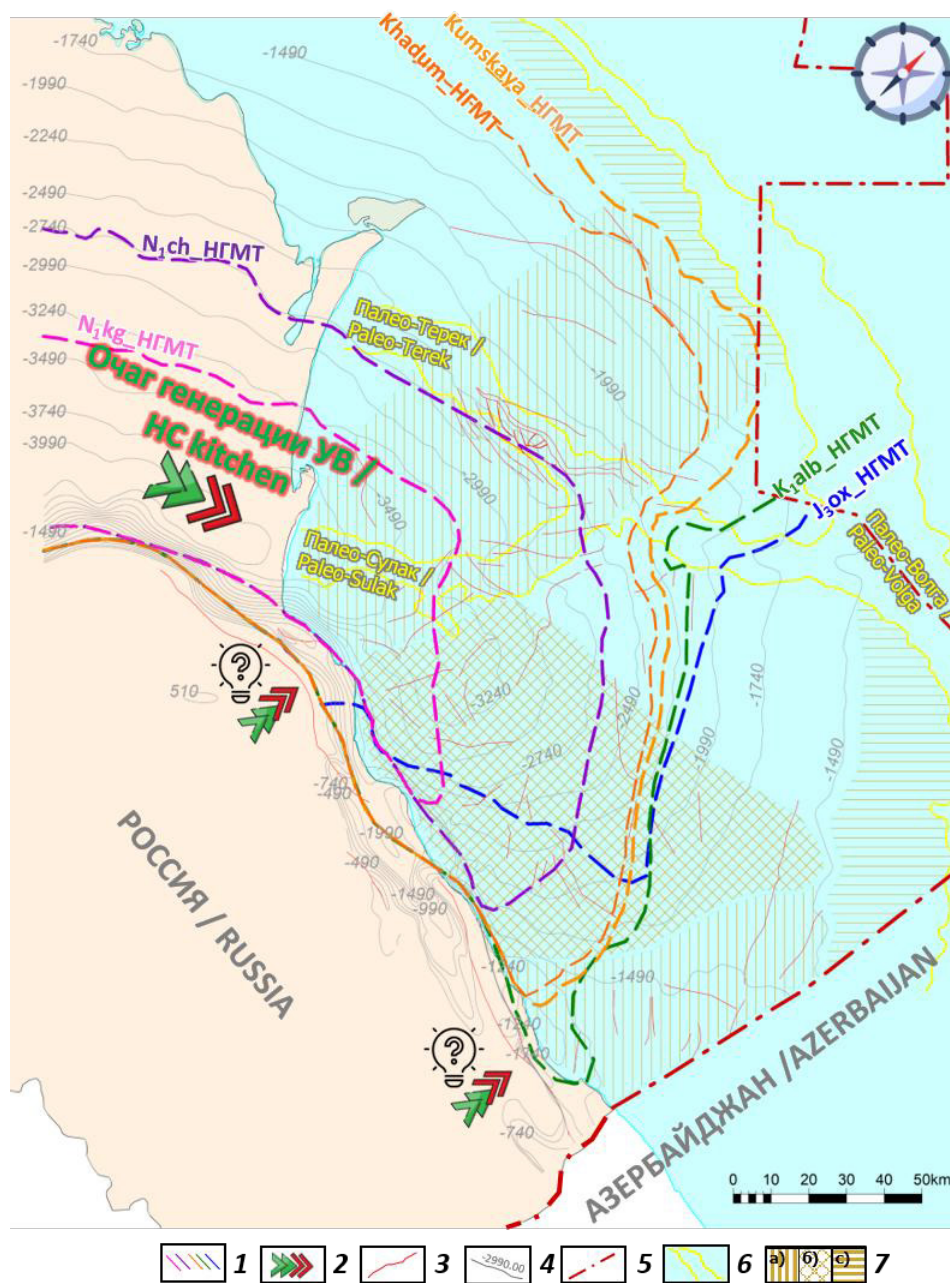
Результаты бассейнового моделирования показали, что существенное влияние на скорость и дальность миграции углеводородов оказывают разрывные нарушения: при высокой проницаемости разломных зон они служат каналами миграции, при низкой – выступают тектоническими экранами, создавая условия для формирования тектонически экранированных залежей [Sobornov, 2021; Даукаев и др., 2023]. Вместе с тем оценка фильтрационных свойств разрывных нарушений представляет собой одну из наиболее сложных задач нефтяной геологии: данный вопрос нередко остаётся неразрешённым даже на месторождениях с высокой степенью выработки запасов и детальной изученностью разреза. Метод бассейнового моделирования наиболее широко применяется именно в условиях слабой геологической изученности территории; в таких случаях наиболее продуктивным подходом является построение и анализ альтернативных сценариев с варьированием проницаемости разломных зон. В сценарии с низкой проницаемостью разломов зоны потенциальных тектонически экранированных залежей локализуются в акватории Среднего Каспия, вблизи депоцентра очага генерации, и в пределах дагестанского шельфа.

По результатам бассейнового моделирования установлено, что основным источником углеводородов для среднемиоценовых объектов западной акватории служат кумская и хадумская нефтегазоматеринские толщи. Начало активной генерации углеводородов кайнозойскими НГМТ датируется рубежом палеоген-неоген. Мезозойские НГМТ (за исключением триасовых) сохраняют генерационный потенциал в современных геологических условиях и продолжают обеспечивать поступление углеводородов в ранее сформированные залежи. Среднемиоценовые НГМТ на большей части территории являются термически незрелыми и не обладают необходимым генерационным потенциалом для формирования залежей в среднемиоценовых отложениях.

Схема распространения очагов генерации углеводородов по каждой нефтегазоматеринской толще с нанесёнными контурами потенциальных перспективных объектов различного типа представлена на рисунке 5. К востоку от антиклинальных зон Южного Дагестана наблюдается резкое погружение мезозойско-кайнозойских отложений в направлении осевой части прогиба с нарастанием их суммарной мощности – прежде всего за счёт глинистых толщ майкопа, среднего и верхнего миоцена, плиоцена. Это создаёт благоприятные условия для сохранности предполагаемых углеводородных скоплений в терригенных отложениях чокрака – карагана, а также в карбонатных трещиноватых коллекторах верхнего мела и палеоцен-эоцена.

В погружённой части складчатого и платформенного бортов Терско-Каспийского прогиба выявлены многочисленные литологические неоднородности и литолого-стратиграфические выклинивания, которые могут служить эффективными ловушками для скоплений углеводородов.

Таким образом, в рассматриваемом регионе, наряду со структурными перспективными объектами юрско-палеогенового возраста, прогнозируется наличие литологических и литолого-стратиграфических ловушек в отложениях майкопа, чокрака, сармата и плиоцена.



1 - контуры очагов генерации НГМТ; 2 - направление миграции; 3 - тектонические нарушения; 4 - изогипсы кровли чокрака, м; 5 - государственная граница; 6 - русла палеорек; 7 - зоны перспективных объектов среднемиоценового возраста (а - антиклинальные и структурно-тектонические; б - литологические; в - стратиграфические)

1 - contours of HC generation kitchens; 2 - migration direction; 3 - faults; 4 - structural contour of the Chokrak top, m; 5 - state border; 6 - paleochannels; 7 - Zones of prospective Middle Miocene objects (a - anticlinal and structural traps; b - lithological traps; c - stratigraphic traps)

Рис. 5. Схема распространения очагов генерации УВ в мезо-кайнозойских НГМТ /

Fig. 5. Distribution map of hydrocarbon generation kitchen boundaries within the Meso-Cenozoic source rock intervals

Заключение

Западная акватория Среднего Каспия характеризуется наличием всей необходимой совокупности геологических условий для формирования промышленных залежей углеводородов в среднемиоценовом комплексе. К ним относятся: зрелые нефтегазоматеринские толщи, породы-коллекторы, региональные флюидоупоры и многочисленные ловушки различного типа. Приоритетными объектами поисков в чокракских и караганских отложениях являются структурно-тектонические и литологически экранированные ловушки, а также стратиграфические ловушки, сформированные эрозионным несогласием. Последние представлены палеодолинами р. Волги, срезающими чокрак-сарматские отложения.

Существенным фактором, повышающим геологическую привлекательность акваториальных объектов, является относительная тектоническая стабильность осадочного чехла неогена в пределах шельфа по сравнению с одновозрастными образованиями прилегающей суши. Менее интенсивная позднектоническая перестройка разреза создаёт благоприятные условия для сохранности возможных углеводородных скоплений и повышает общую перспективность комплекса. Дополнительным преимуществом выступает приуроченность потенциальных объектов к малым и средним глубинам залегания, что существенно снижает технологические риски и затраты при проведении геологоразведочных работ.

На основании установленных закономерностей пространственного размещения залежей углеводородов в регионе и имеющихся геохимических данных прогнозируемый фазовый состав флюидов в среднемиоценовых ловушках акватории – преимущественно нефтяной, что согласуется с доминирующим типом залежей в одновозрастных отложениях Предгорного Дагестана.

Результаты бассейнового моделирования показали, что генерация углеводородов для среднемиоценовых ловушек западной акватории Среднего Каспия обеспечивалась преимущественно за счёт кумской и хадумской НГМТ.

Полученные результаты свидетельствуют о высоком нефтегазовом потенциале среднемиоценового комплекса западной акватории Среднего Каспия и могут служить научным обоснованием для развития практически нереализованного в регионе направления поисково-разведочных работ, ориентированного на выявление неантиклинальных ловушек в чокракских и караганских отложениях.

Литература

1. Булач М.Х., Вассоевич Н.Б. Литологические залежи в чокракских отложениях Дагестана. Л.: ВНИГРИ, 1953.
2. Буторин Г.Д., Галин В.Л., Галина А.А. и др. Закономерности размещения и условия формирования залежей нефти и газа Предкавказья. Т. IV. Дагестанская АССР. Труды Института геологии и разработки горючих ископаемых. М.: Недра, 1980. – 207 с.
3. Вассоевич Н.Б. Образование нефти в терригенных отложениях (на примере чокракско-караганских слоев Терского передового прогиба) // Вопросы образования нефти. Л.: Гостоптехиздат, 1958. – С. 9–221.
4. Даукаев А.А., Гайсумов М.Я., Бадаев С.В. Доюрское основание Терско-Каспийского прогиба в связи с проблемой глубинной нефти и формировании ее скоплений // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 131–144. DOI 10.46698/VNC.2023.19.53.010.
5. Керимов И.А., Даукаев А.А., Бачаева Т.Х. Ресурсная база УВ сырья и перспективы нефтегазоносности Восточного Предкавказья // Геология и геофизика Юга России. – 2014. – № 2. – С. 30–41. DOI: 10.23671/VNC.2014.2.55430.
6. Куницына И.В., Земцов П.А., Малышев Н.А., Вержбицкий В.Е. Закономерности формирования и особенности распространения чокракских песчаных коллекторов Придаге-

станского шельфа // Геология нефти и газа. – 2023. – № 6. – С. 103–115. DOI: 10.47148/0016-7894-2023-6-103-115.

7. Шарафутдинов В.Ф., Шарафутдинов Ф.Г., Магомедов А.Х. Геология и перспективы нефтегазоносности олигоцен-нижнемиоценовых отложений Дагестана. Махачкала: Геолком РД, 1999. – 224 с.

8. Шарафутдинов В.Ф., Соколов Д.В. К вопросу перспектив нефтегазоносности кайнозойских отложений восточной части дагестанского сектора Терско-Каспийского прогиба // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2022. – № 4(91). – С. 10–16. DOI: 10.33580/2541-9684-2022-91-4-10-16.

9. Яндарбиев Н.Ш., Керимов И.А., Степанов А.Н., Яндарбиева Д.Н. О гетерогенности нефтей Восточного Предкавказья // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2023. – Т. 8. № 1(31). – С. 61–68. DOI: 10.25744/genb.2023.86.29.006.

10. Яндарбиев Н.Ш., Козлова Е.В., Фадеева Н.П., Крылов О.В., Наумчев Ю.В. Геохимия углеводородов Терско-Каспийского прогиба // Георесурсы. – 2017. – Спецвыпуск. Ч. 2. – С. 227–239. DOI: 10.18599/grs.19.22.

11. Gavrilov Yu.O., Nedumov R., Shchepetova E., Shcherbinina E., Kozlova E., Golovanova O., Pokrovsky B. Stratigraphy, sedimentology and geochemistry of the Oligocene–lower Miocene Maikop Group in Dagestan, NE Caucasus // Journal of Petroleum Geology. – 2021. – Vol. 44. No. 3. – pp. 317–348. DOI: 10.1111/jpg.12795.

12. Sachsenhofer R.F., Bechtel A., Gratzner R., Nachtmann W., Zacher G. Paratethyan petroleum source rocks: An overview // Journal of Petroleum Geology. – 2018. – Vol. 41. No. 3. – pp. 219–245. DOI: 10.1111/jpg.12702.

13. Sobornov K. Structure and evolution of the Terek-Caspian fold-and-thrust belt: New insights from regional seismic data // Journal of Petroleum Geology. – 2021. – Vol. 44. No. 3. pp. 259–286. DOI: 10.1111/jpg.12793.

14. Ulmishek G.F. Petroleum geology and resources of the Middle Caspian Basin, Former Soviet Union // U.S. Geological Survey. – 2001. – Bulletin 2201-A. – 38 p. DOI: 10.3133/b2201A.

15. Yandarbiev N.Sh., Sachsenhofer R.F., Ajuaba S., Bechtel A., Yandarbieva D.N. Geochemistry of oils in the Terek-Caspian foredeep and Prikumsk Swell, NE Greater Caucasus, Southern Russia // Journal of Petroleum Geology. – 2021. – Vol. 44. No. 3. – pp. 287–315. DOI: 10.1111/jpg.12794.

References

1. Bulach M.Kh., Vassoevich N.B. Lithological Deposits in the Chokrak Sediments of Dagestan. Leningrad. VNIGRI. 1953. (In Russ.)

2. Butorin G.D., Galin V.L., Galina A.A. et al. Patterns of distribution and formation conditions of oil and gas accumulations in the Ciscaucasia region. Vol. IV. Dagestan ASSR. Proceedings of the Institute of Geology and Mineral Resources Development. Moscow. Nedra. 1980. 207 p. (In Russ.)

3. Vassoevich N.B. Oil generation in terrigenous deposits (based on the Chokrakian–Karaganian strata of the Terek Foreland Trough). In: Problems of Oil Formation. Leningrad. Gostoptekhizdat. 1958. pp. 9–221. (In Russ.)

4. Daukaev A.A., Gaysumov M.Ya., Badaev S.V. Pre-Jurassic basement of the Terek-Caspian basin in connection with the problem of deep oil and the formation of its accumulations. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 131–144. DOI: 10.46698/VNC.2023.19.53.010. (In Russ.)

5. Kerimov I.A., Daukaev A.A., Bachaeva T.Kh. Resource base of hydrocarbon feedstock and prospects for oil and gas bearing capacity of the Eastern Pre-Caucasus. Geology and Geophysics of Russian South. 2014. No. 2. pp. 30–41. DOI: 10.23671/VNC.2014.2.55430. (In Russ.)

6. Kunitsyna I.V., Zemtsov P.A., Malyshev N.A., Verzhbitsky V.E. Depositional settings and patterns of Chokrak sandy reservoir distribution within Dagestan shelf. Geologiya Nefti i Gaza. 2023. No. 6. pp. 103–115. DOI: 10.47148/0016-7894-2023-6-103-115. (In Russ.)

7. Sharafutdinov V.F., Sharafutdinov F.G., Magomedov A.Kh. Geology and oil and gas potential of the oligocene–lower miocene deposits of Dagestan. Makhachkala. Geolkom RD. 1999. 224 p. (In Russ.)

8. Sharafutdinov V.F., Sokolov D.V. On the issue of oil and gas potential of Cenozoic deposits of the Eastern of the Dagestan sector of the Tersko–Caspian foredeep. *Proceedings of the Institute of Geology DSC RAS*. 2022. No. 4(91). pp. 10–16. DOI: 10.33580/2541-9684-2022-91-4-10-16. (In Russ.)
9. Yandarbyev N.Sh., Kerimov I.A., Stepanov A.N., Yandarbyeva D.N. About oils heterogeneity of the Eastern Ciscaucasia. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2023, Vol. 8. No. 1(31). pp. 61–68. DOI: 10.25744/genb.2023.86.29.006. (In Russ.)
10. Yandarbyev N.Sh., Kozlova E.V., Fadeeva N.P., Krylov O.V., Naumchev Yu.V. Geochemistry of hydrocarbons of the Terek-Caspian trough. *Georesources*. 2017. Special issue. Part 2. pp. 227–239. DOI: 10.18599/grs.19.22. (In Russ.)
11. Gavrilov Yu.O., Nedumov R., Shchepetova E., Shcherbinina E., Kozlova E., Golovanova O., Pokrovsky B. Stratigraphy, sedimentology and geochemistry of the Oligocene–lower Miocene Maikop Group in Dagestan, NE Caucasus. *Journal of Petroleum Geology*. 2021. Vol. 44. No. 3. pp. 317–348. DOI: 10.1111/jpg.12795.
12. Sachsenhofer R.F., Bechtel A., Gratzner R., Nachtmann W., Zacher G. Paratethyan petroleum source rocks: An overview. *Journal of Petroleum Geology*. 2018. Vol. 41. No. 3. pp. 219–245. DOI: 10.1111/jpg.12702.
13. Sobornov K. Structure and evolution of the Terek-Caspian fold-and-thrust belt: New insights from regional seismic data. *Journal of Petroleum Geology*. 2021. Vol. 44. No. 3. pp. 259–286. DOI: 10.1111/jpg.12793.
14. Ulmishek G.F. Petroleum geology and resources of the Middle Caspian Basin, Former Soviet Union. U.S. Geological Survey. 2001. Bulletin 2201-A. 38 p. DOI: 10.3133/b2201A.
15. Yandarbiev N.Sh., Sachsenhofer R.F., Ajuaba S., Bechtel A., Yandarbieva D.N. Geochemistry of oils in the Terek-Caspian foredeep and Prikumsk Swell, NE Greater Caucasus, Southern Russia. *Journal of Petroleum Geology*. 2021. Vol. 44. No. 3. pp. 287–315. DOI: 10.1111/jpg.12794.

УДК 631-551.58

DOI: 10.46698/VNC.2026.32.56.001

Оригинальная статья

Изменчивость агроклиматических условий Чеченской Республики и их влияние на урожайность зерновых культур

Л.Р. Бекмурзаева

Грозненский государственный нефтяной технический университет
им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, 100,
e-mail: eip-eco2017@yandex.ru

Статья поступила: 08.03.2026, доработана: 15.06.2026, принята к публикации: 17.06.2026

Резюме: Актуальность работы. Климатические изменения сопровождаются ростом среднегодовых температур, изменением режима осадков и продолжительности вегетационного периода, а также увеличением количества экстремальных погодных явлений. Все эти изменения уже сейчас требуют внедрения адаптационных мер для смягчения последствий климатических изменений и обеспечения продовольственной безопасности. Цель – оценка динамики современных агроклиматических условий Чеченской Республики и их влияние на урожайность зерновых культур. **Материалы и методы.** Методами математической статистики были проанализированы показатели тепло- и влагообеспеченности территории за период с 1961 по 2025 гг. по материалам метеостанций Грозный и Гудермес. Проводилось осреднение метеопараметров по пятилетиям, а результаты осреднения сравнивались с нормой. Для оценки погодных условий, влияющих на рост и развитие зерновых культур, были построены климатограммы Вальтера-Госсена. **Результаты.** В период с 1961 по 2025 гг. в степных ландшафтах Чеченской Республики отмечается улучшение тепло- и влагообеспеченности территории. Среднегодовая температура выросла на 1 °С. Соответственно, выросли суммы активных температур, увеличился период активной вегетации. Осадки выросли на 9–12 %. Несмотря на периоды с увеличением и уменьшением ГТК, в целом этот показатель остался в пределах нормы. Осадки в апреле (в период фазы выхода в трубку и колошения зерновых) были выше нормы или немного ниже неё, т.е. достаточны. Анализ климатограмм выявил, что в начале периода активной вегетации преобладают гумидные условия, а аридные условия встречаются в июле–сентябре, в период созревания и уборки зерновых. Выявлена прямая статистически значимая связь урожайности со среднегодовой температурой. В ходе регрессионного анализа выявлено, что увеличение температуры выше 15 °С отрицательно сказывается на урожайности зерновых культур. **Выводы.** Улучшение тепло- и влагообеспеченности территории Чеченской Республики, а именно рост среднегодовой температуры воздуха, а также температуры и осадков начала периода активной вегетации (апрель–июнь), благоприятно сказывается на росте и развитии зерновых культур. Критическим для урожайности зерновых культур является увеличение среднегодовой температуры выше 15 °С.

Ключевые слова: изменение климата, температура, осадки, ГТК, изменение агроклиматических условий, вегетационный период.

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания ГГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова FZNU-2024-0001 «Оценка влияния современных климатических изменений на природные и природно-антропогенные комплексы (на примере Чеченской Республики)».

Для цитирования: Бекмурзаева Л.Р. Изменчивость агроклиматических условий Чеченской Республики и их влияние на урожайность зерновых культур. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 186–197. DOI: 10.46698/VNC.2026.32.56.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.32.56.001

Original paper

Variability of agro-climatic conditions of the Chechen Republic and their impact on grain yields

L.R. Bekmurzaeva

Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov,
100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 364051, Russian Federation,
e-mail: eip-eco2017@yandex.ru

Received: 08.03.2026, revised: 15.06.2026, accepted: 17.06.2026

Abstract: Relevance. Climate change is accompanied by an increase in annual temperatures, changes in precipitation patterns and the length of the growing season, and an increase in the number of extreme weather events. All these changes already require the introduction of adaptation measures to mitigate the effects of climate change and ensure food security. **Aim** – assessment of the dynamics of modern agro-climatic conditions in the Chechen Republic and their impact on grain yields. **Materials and methods.** Using mathematical statistics, the indicators of heat and moisture supply of the territory for the period from 1961 to 2025 were analyzed based on the materials of the Grozny and Gudermes weather stations. The meteorological parameters were averaged over five years, and the averaging results were compared with the climatic norm. Walter-Gossen climatograms were constructed to assess the weather conditions affecting the growth and development of grain crops. **Results.** In the period from 1961 to 2025, the improvement of heat and moisture supply to the territory was noted in the steppe landscapes of the Chechen Republic. The annual temperature has increased by 1 °C. Accordingly, the amount of active temperatures has increased, and the period of active vegetation has increased. Precipitation increased by 9-12 %. Despite periods of increasing and decreasing GTC, in general, this indicator remained within the normal range. Precipitation in April (during the phase of emergence into the tube and earing of grain) is higher than normal or slightly below normal, i.e. sufficient. The analysis of climatograms revealed that humid conditions prevail at the beginning of the active vegetation period, arid conditions occur in July-September, during the ripening and harvesting of grain. A direct statistically significant relationship between yield and average annual temperature has been revealed. During the regression analysis, it was revealed that an increase in temperatures above 15 °C negatively affects the yield of grain crops. **Conclusions.** The improvement of heat and moisture supply to the territory of the Chechen Republic, namely, an increase in annual air temperature, as well as temperature and precipitation at the beginning of the active growing season (April–June), has a beneficial effect on the growth and development of grain crops. An increase in temperatures above 15 °C is critical for the yield of grain crops.

Keywords: climate changes, temperature, precipitation, GTC, changes in agro-climatic conditions, growing season.

Acknowledgments: *The work was carried out within the framework of the state task of the State Scientific Technical University named after. Academician M.D. Millionshchikova FZNU-2024-0001 “Assessment of the impact of modern climate change on natural and natural-anthropogenic complexes (using the example of the Chechen Republic)”.*

For citation: Bekmurzaeva L.R. Variability of agro-climatic conditions of the Chechen Republic and their impact on grain yields. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 186–197. DOI: 10.46698/VNC.2026.32.56.001

Введение

Современные изменения климата стали одним из главных факторов, влияющих на развитие сельского хозяйства во многих регионах мира. Они сопровождаются ростом среднегодовых температур, изменением режима осадков и продолжительности вегетационного периода, а также увеличением количества экстремальных погодных явлений. Все эти процессы уже сейчас требуют внедрения адаптационных мер для смягчения последствий климатических изменений и обеспечения продовольственной безопасности [Третий оценочный доклад ..., 2022].

Сельское хозяйство в Чеченской Республике играет ведущую роль в экономике. Основными возделываемыми культурами являются зерновые [Чеченская Республика в цифрах ..., 2024]. Посевные площади зерновых культур располагаются в пределах степных ландшафтов Чеченской Республики, так как эти территории издавна являются удобными для освоения [Керимов и др., 2024].

Климатические изменения Северного Кавказа и его регионов отражены в ряде работ [Ашабокова и др., 2020; Шаповалов и др., 2022; Федченко и др., 2024; Бекмурзаева и др., 2025; Kerimov et al., 2024; Ahouissoussi et al., 2014; Baghirova, 2025; Gudko et al., 2024; Limareva et al., 2017; Петрушина и др., 2023; Rzaeva et al., 2023; Shahgedanova et al., 2009; Tashilova et al., 2022; Vinogradova et al., 2017]. Однако тема изменчивости агроклиматических условий в этих работах раскрыта недостаточно.

Целью работы является – оценка динамики современных агроклиматических условий Чеченской Республики и их влияние на урожайность зерновых культур.

Методы исследования

Для выявления современных агроклиматических условий степных ландшафтов Чеченской Республики и их влияния на урожайность зерновых культур, были проанализированы показатели тепло- и влагообеспеченности территории за период с 1961 по 2025 гг., традиционно используемые в агроклиматологии:

- среднемесячные и среднегодовые температуры воздуха;
- суммы активных температур, превышающих температурный предел;
- максимальные и минимальные температуры;
- даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через температурный предел;
- месячное и годовое количество осадков;
- гидротермический коэффициент (ГТК).

Проводилось осреднение метеопараметров по пятилетиям, а результаты осреднения сравнивались с нормой. В качестве нормы были использованы данные из справочника по климату СССР [Справочник по климату СССР ..., 1966]. Особое внимание уделено ГТК, температуре и осадкам начала активной вегетации (апрель, май и июнь), а также сумме осадков холодного периода, т.к. данные показатели оказывают влияние на ведение сельскохозяйственного производства зерновых культур [Волков и др., 2021].

В качестве источника данных были использованы сведения по метеостациям Грозный и Гудермес за период с 1961 по 2025 гг. Эти данные находятся в свободном доступе на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД).

Для более детального анализа влияния климатических условий на урожайность зерновых культур были построены климатограммы Вальтера-Госсена. Для их построения осреднялись сведения по температуре и осадкам за трехлетний период.

В работе проводится оценка исключительно агроклиматических условий [Ермакова и др., 2010], что называют расчетом климатически обусловленной урожайности.

Этот подход изолирует влияние погоды, позволяя оценить базовый сельскохозяйственный потенциал территории без учета интенсивных агротехнологий.

Результаты исследования

Среднегодовая температура воздуха в степных ландшафтах Чеченской Республики за период с 1961 по 2025 г. варьирует в пределах 11,0–11,7 °С. Годовое отклонение от нормы в сторону потепления составило 0,9–1,0 °С. Увеличение температуры отмечается во всех месяцах года, однако в месяцы холодного периода увеличение температуры более выражено (табл. 1). Линейный тренд иллюстрирует рост среднегодовой температуры, а полиномиальный показывает периоды с ростом и снижением температуры (рис. 1, 2).

Средняя температура за период с 1961 по 2025 г.

Таблица 1 / Table 1

**Средняя температура за период с 1961 по 2025 г. /
The average temperature for the period from 1961 to 2025**

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Гудермес / Gudermes													
Среднее / Average	-1,5	-0,5	4,7	11,5	17,4	22,3	25,0	24,4	19,1	12,0	5,8	0,7	11,7
Разница / Difference	1,5	1,1	1,6	1,6	0,6	1,1	0,6	0,6	0,9	0,2	1,0	1,0	1,0
Грозный / Grozny													
Среднее / Average	-2,1	-1,3	4,2	11,1	16,9	21,2	24,1	23,6	18,4	11,2	5,0	0,0	11,0
Разница / Difference	1,5	1,0	1,8	1,8	0,4	0,4	0,3	0,4	1,0	0,2	1,0	1,2	0,9

Примечание. Здесь и далее: среднее – среднее значение за период с 1961 по 2025 гг., разница – разница между средним значением за период с 1961 по 2025 г. и данными из Справочника по климату СССР /

Note. Here and further: average is the average value for the period from 1961 to 2025, the difference is the difference between the average value for the period from 1961 to 2025 and the data from the USSR Climate Handbook.

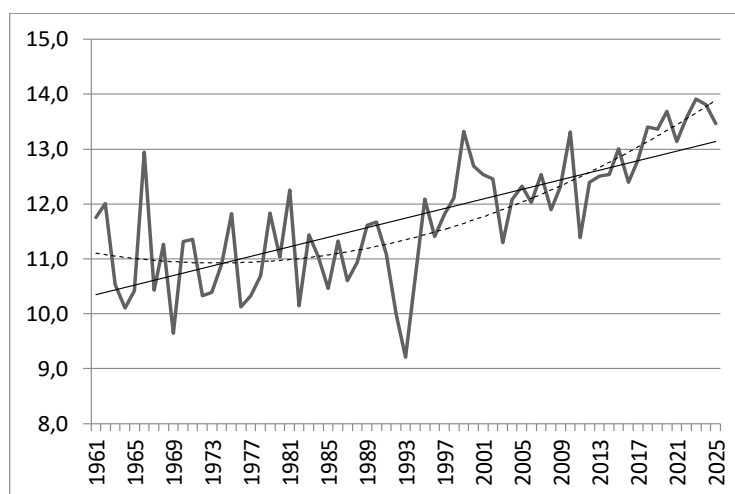


Рис. 1. Изменение среднегодовой температуры в период с 1961 по 2025 г. по М Гудермес /

Fig. 1. Annual temperature change in the period from 1961–2025 to Gudermes

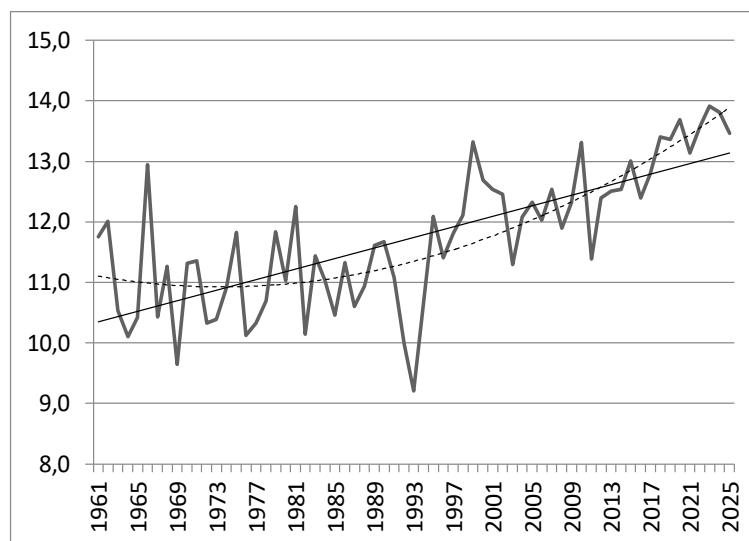


Рис. 2. Изменение среднегодовой температуры в период с 1961 по 2025 г. по М Грозный /

Fig. 2. Change in annual temperature in the period from 1961–2025 to Grozny

Отмечается рост суммы активных температур, превышающих 5 °С, причем в Гудермесе этот показатель вырос более чем на 10 %. Сумма активных температур, превышающих 10 °С, также выросла на 7–11 % (табл. 2). Кроме того, выросла средняя температура января (самого холодного месяца) на 1,5 °С, а также средняя температура июля (самого жаркого месяца) – на 0,3–0,6 °С.

Таблица 2 / Table 2

Сумма активных температур, превышающая 5 и 10 °С за период с 1961 по 2025 г. /
The sum of active temperatures exceeding 5 and 10 °C for the period from 1961 to 2025

	Грозный / Grozny				Гудермес / Gudermes			
	T>5	T>10	T января T January	T июля T July	T>5	T>10	T января T January	T июля T July
Среднее / Average	4034	3705	-2,1	24,1	3860	3545	-1,5	25,0
Разница / Difference	174 (4%)	266 (7%)	1,5	0,3	394 (10%)	386 (11%)	1,5	0,6

Весна наступает раньше, а осень – позже. В среднем период с переходом температуры воздуха через 0 °С весной наступает раньше на 8–9 дней, а осенью – позже на 3–11 дней. Даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 5 °С весной сдвинулись на 9–12 дней вперед, а осенью – на 3–4 дня позже. Период с температурами воздуха выше 10 °С весной заметно увеличился на 10–14 дней, а осенью – на 2–3 дня (табл. 3).

В среднем в степных ландшафтах Чеченской Республики выпадает около 490 мм осадков в год. Максимальное количество осадков приходится на теплый период года. Годовое количество осадков выросло на 9–12 %, при этом в июле–сентябре отмечается их недобор (табл. 4). Несмотря на рост осадков в Гудермесе линейный тренд указывает на их снижение (рис. 3, 4).

Таблица 3 / Table 3

**Даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха
через температурный предел /
The dates of the steady transition of the average daily air temperature
over the temperature limit**

	Норма / norm	1961- 2025	Отклонение в днях / Deviation in days	Норма / norm	1961- 2025	Отклонение в днях / Deviation in days
	Весна / spring			Осень / autumn		
Даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0 °С весной и осенью/ Dates of sustainable transition of the average daily air temperature through 0 °C in spring and autumn						
Гудермес / Gudermes	25.02	16.02	9	12.12	15.12	3
Грозный / Grozny	02.03	22.02	8	04.12	15.12	11
Даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 5 °С весной и осенью/ Dates of sustainable transition of the average daily air temperature through 5 °C in spring and autumn						
Гудермес / Gudermes	25.03	16.03	9	14.11	17.11	3
Грозный / Grozny	29.03	17.03	12	11.11	15.11	4
Даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 10 °С весной и осенью / Dates of sustainable transition of the average daily air temperature through 10 °C in spring and autumn						
Гудермес / Gudermes	16.04	07.04	14	24.10	27.10	3
Грозный / Grozny	17.04	07.04	10	20.10	22.10	2

Таблица 4 / Table 4

**Месячное и годовое количество осадков за период с 1961 по 2025 г. /
Monthly and annual precipitation for the period from 1961 to 2025**

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Гудермес / Gudermes													
Среднее / Average	29	29	33	37	60	65	47	39	42	39	36	35	490
Разница / Difference	9	8	4	6	12	13	3	-4	-4	0	1	10	57
Грозный / Grozny													
Среднее / Average	22	23	28	37	62	74	56	45	40	39	31	29	486
Разница / Difference	4	7	3	5	9	4	-1	-4	-1	6	3	9	44

Несмотря на рост осадков в Гудермесе линейный тренд указывает на их снижение (рис. 3,4).

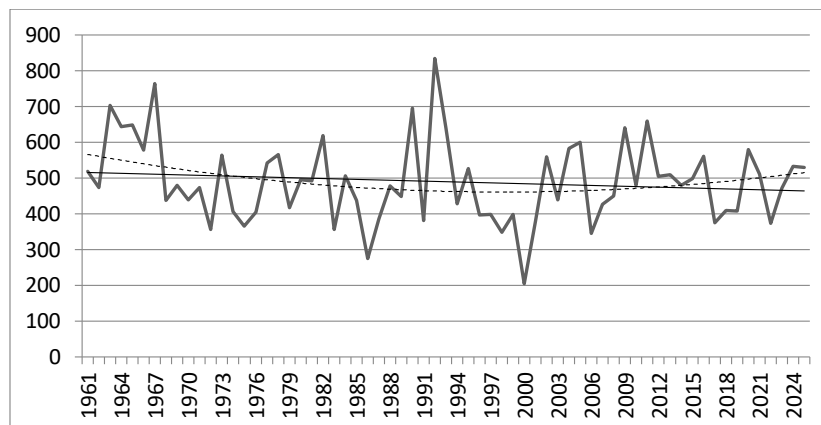


Рис. 3. Изменение годового количества осадков в период с 1961 по 2025 г. по М Гудермес /
Fig. 3. Change in annual precipitation in the period from 1961–2025 to Gudermes

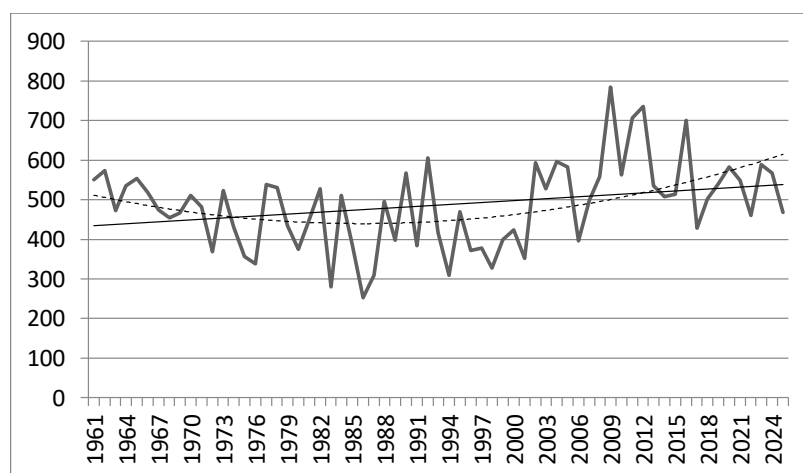


Рис. 4. Изменение годового количества осадков в период с 1961 по 2025 г. по М Грозный /
Fig. 4. Change in annual precipitation in the period from 1961–2025 to Grozny

В среднем ГТК за период с 1961 по 2025 г. составил 0,8–0,9 (табл. 5). Несмотря на изменение температуры и количества осадков в течение вегетационного периода, ГТК с 1961 по 2025 г. остался в пределах среднемноголетнего значения. Условия увлажнения территории в период активной вегетации не изменились.

Таблица 5 / Table 5

**Изменчивость ГТК за период с 1961 по 2025 г. /
The variability of the GTC for the period from 1961 to 2025**

	Грозный / Grozny	Гудермес / Gudermes
Среднее / Average	0,9	0,8
Разница / Difference	0,0	0,0

Анализ данных по урожайности зерновых и зернобобовых культур в период с 2003 по 2025 г. показал устойчивый рост: коэффициент аппроксимации линейного

тренда составил 0,8677 (рис. 5). Зерновые и зернобобовые культуры – основной вид сельскохозяйственных культур, возделываемых в степных ландшафтах Чеченской Республики. Урожайность в период 2003–2025 г. варьировала от 8,5 до 29,5 ц/га.

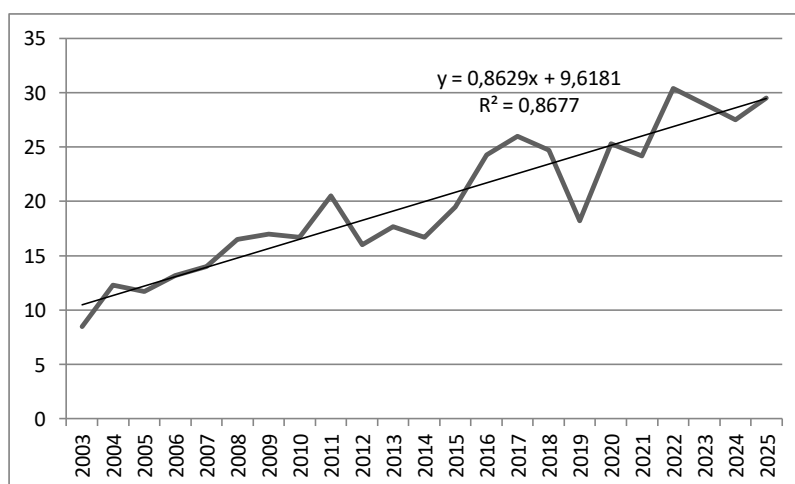


Рис. 5. Динамика урожайности зерновых и зернобобовых культур по годам /

Fig. 5. Dynamics of grain and leguminous crop yields by year

На формирование колоса зерновых культур большое влияние оказывают ГТК, температура и осадки начала активной вегетации (апрель–июнь) и осадки холодного периода (табл. 6).

Таблица 6 / Table 6

**Отклонения пятилетних значений от нормы /
Deviations of five-year values from the norm**

Период / period	ГТК GTK	T _{0,4}	T _{0,5}	T _{0,6}	R _{0,4}	R _{0,5}	R _{0,6}	R _{<0}
Грозный / Grozny								
2001–2005	0,10	-0,1	0,8	0,3	8	-24	50	-31
2006–2010	0,15	-0,7	-0,6	0,9	3	9	-11	2
2011–2015	0,19	-0,1	0,8	0,6	21	7	9	25
2016–2020	0,04	-0,3	0,2	1,0	6	41	-2	-18
2021–2025	-0,03	-0,4	0,6	1,3	1	20	-6	-24
Гудермес / Gudermes								
2001–2005	0,11	-0,4	0,0	-0,9	9	-19	22	-28
2006–2010	-0,07	-0,4	-0,2	0,9	-3	-2	2	-9
2011–2015	0,06	0,3	1,6	1,3	12	7	6	2
2016–2020	-0,19	0,7	1,4	1,4	-2	0	-14	-9
2021–2025	-0,06	0,4	1,1	0,9	11	4	-7	2

Динамика ГТК за последние 25 лет показывает чередование периодов с повышенным и пониженным увлажнением. В Грозном незначительное снижение увлажнения отмечается только в последнее рассматриваемое пятилетие, тогда как в Гудермесе увлажнение периода активной вегетации меняется от года к году. В 2001–2005 и 2011–2015 годах оно повышенное, а в остальные годы – сниженное, причем в 2016–2020 гг. отмечается довольно существенное снижение на 0,19. Критическим периодом в по-

треблении воды для зерновых культур считаются фазы выхода в трубку и колошения, т.е. период образования репродуктивных органов. На Северном Кавказе фаза выхода в трубку приходится на конец марта – апрель. Осадки в апреле в период с 2001 по 2025 год были выше нормы или немного ниже неё, т.е. существенного влияния на снижение урожайности в рассматриваемый период времени они не оказывали.

Температура в апреле в Грозном существенно ниже нормы; в Гудермесе она была ниже нормы в период с 2001 по 2010 г., а начиная с 2011 по 2025 г. отклонение температуры от нормы (в большую сторону) составляло 0,3–0,7 °С. В апреле часто отмечаются заморозки, однако зерновым культурам в этот период они вреда не наносят.

Температуры мая и июня, за исключением 2006–2010 и 2001–2005 гг. (Гудермес), демонстрировали отклонение от нормы в положительную сторону. В мае отклонение температуры от нормы в Грозном составило 0,2–0,8 °С, в Гудермесе — 1,1–1,6 °С. В июне отклонение от нормы в Грозном варьирует от 0,3 до 1,3 °С, а в Гудермесе — 0,9–1,4 °С.

При этом сильный недобор осадков в мае отмечался в 2001–2005 гг. Большое увеличение количества осадков в мае по Грозному отмечается в последние 10 лет рассматриваемого периода: на 41 и 20 мм. В остальное время осадки были около нормы.

В июне в Грозном недостаток осадков отмечался в 2006–2010 и в 2016–2025 гг. В Гудермесе (на 14–7 мм), как и в Грозном (на 2–6 мм), недобор наблюдается в последнее рассматриваемое десятилетие.

Количество осадков холодного периода в большинстве случаев имеет отрицательное отклонение или является близким к норме, за исключением периода 2011–2015 гг. в Грозном, когда положительное отклонение составило 25 мм. Снежный покров неустойчив.

Для оценки влияния погодных условий на рост и развитие зерновых культур были проанализированы климатограммы Вальтера-Госсена. Для этого данные по среднемесячным температурам и осадкам осреднялись по трехлетиям. Анализ климатограмм по Грозному и Гудермесу позволяет сделать общие выводы. В 2011–2025 гг. преобладают гумидные условия над аридными. Особенно интенсивно осадки выпадают в начале периода активной вегетации (март–май). Однако практически во всех климатограммах в Гудермесе прослеживается снижение осадков в июле–сентябре, тогда как в Грозном снижение осадков сдвинуто в сторону августа–сентября. Снижение увлажнения в эти месяцы не оказывает существенного влияния на зерновые культуры, так как это период созревания и уборки урожая. Таким образом, погодные условия в период с 2001 по 2025 г. для произрастания зерновых культур в целом благоприятны.

Для оценки влияния климатических факторов на урожайность (Y) также был проведен множественный регрессионный анализ. Оценивались такие показатели, как среднегодовая температура (X1), годовые осадки (X2), сумма активных температур выше 10 °С (X3), сумма активных температур выше 15 °С (X4), осадки теплого периода (X5), осадки холодного периода (X6) и ГТК (X7) за период с 2003 по 2025 г.

В результате регрессионного анализа была выявлена прямая статистически значимая связь урожайности со среднегодовой температурой ($p = 0,032$). При увеличении X1 на 1 единицу ожидаемое изменение Y увеличивается примерно на 6,7.

Также была выявлена обратная связь между урожайностью и суммой активных температур выше 15 °С ($p = 0,0068$). Увеличение значения X4 связано со снижением Y. Между остальными показателями взаимосвязи не установлены.

Выводы

Отмечается увеличение годовой температуры воздуха в период с 1961 по 2025 г. по сравнению с нормой в целом на 1 °С. Наибольший вклад в потепление внесли месяцы холодного периода (ноябрь–март). Выросли суммы активных температур,

превышающих 5 °C и 10 °C, на 4–10 % и 7–11 % соответственно. Зимы стали мягче, средняя температура января стала выше на 1,5 °C. Средняя температура июля (самого жаркого месяца) повысилась на 0,3–0,6 °C. Отмечается увеличение вегетационного периода. Весна наступает на 8–12 дней раньше, а осень — на 3–11 дней позже. Осадки выросли на 9–12 %. Несмотря на периоды с увеличением и уменьшением ГТК, в целом этот показатель остался в пределах нормы. На изучаемой территории важное значение для зерновых культур имеют осадки в период фазы выхода в трубку и колошения; это происходит в конце марта – апреле. Анализ данных показал, что в апреле осадки в период с 2001 по 2025 год были выше нормы или немного ниже нормы, то есть достаточны. Температуры начала периода активной вегетации (апрель–июнь) выросли, за исключением апреля, когда практически во всех пентадах отмечается снижение температуры. Отклонения от нормы осадков холодного периода в большинстве своем отрицательны или близки к норме. Снежный покров неустойчив. Анализ климатограмм по Грозному и Гудермесу позволяет сделать общие выводы о погодных условиях для произрастания зерновых культур. В 2011–2025 гг. преобладают гумидные условия над аридными. Особенно интенсивно осадки выпадают в начале периода активной вегетации (март–май). Однако практически во всех климатограммах Гудермеса прослеживается снижение осадков в июле–сентябре, тогда как в Грозном снижение осадков сдвинуто в сторону августа–сентября. Снижение увлажнения в эти месяцы не оказывает существенного влияния на зерновые культуры, так как это период созревания и уборки урожая. Оценка данных об урожайности сельскохозяйственных культур за период с 2003 по 2025 гг. говорит об их росте. Выявлена прямая статистически значимая связь урожайности со среднегодовой температурой. При увеличении годовой температуры на 1 °C ожидается увеличение урожайности на 6,7 ц/га. Кроме того, в ходе регрессионного анализа выявлено, что увеличение среднегодовой температуры выше 15 °C отрицательно сказывается на урожайности зерновых и зернобобовых культур.

Таким образом, улучшение тепло и влагообеспечения территории Чеченской Республики, а именно рост годовой температуры воздуха, а также температуры и осадков начала периода активной вегетации (апрель–июнь) благоприятно сказывается на росте и развитии зерновых культур. Критическим для урожайности зерновых культур является увеличение среднегодовой температуры выше 15 °C.

Литература

1. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В. Пространственно-временное изменение климата юга европейской территории России, оценка его последствий, методы и модели адаптации АПК. Нальчик: Печатный двор, – 2020. 476 с.
2. Бекмурзаева Л.Р., Братков В.В., Керимов И.А. Оценка современных агроклиматических условий Северного Кавказа на основе наземных метеонаблюдений и данных низкого пространственного разрешения // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30. № 6. – С. 27–35. DOI: 10.33764/2411-17592025-30-6-27-35.
3. Волков С.Н., Савинова С.В., Черкашина Е.В., Шаповалов Д.А., Братков В.В., Ключин П.В. Оценка современных климатических изменений на территории Предкавказья для целей прогнозирования урожайности озимой пшеницы // Юг России: экология, развитие. – 2021. – Т. 16. № 1. – С. 117–127. DOI: 10.18470/1992-1098-2021-1-117-127.
4. Ермакова Л.Н., Толмачева Н.И., Безматерных Е.А. Оценка агроклиматических ресурсов территории Пермского края // Географический вестник. – 2010. – № 2(13). – С. 52–58.
5. Керимов И.А., Братков В.В., Бекмурзаева Л.Р. Динамика агроклиматических показателей степных ландшафтов Северного Кавказа по данным наземных наблюдений // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 219–230. DOI: 10.46698/VNC.2024.92.31.017.

6. 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. DOI: 10.31857/S2587556623070130.
7. Справочник по климату СССР. Вып. 13. Ч. 2 / Под ред. В.Ф. Проценко. – Л.: Гидрометиздат, 1966. – 492 с.
8. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – СПб.: Научные технологии, 2022. – 124 с.
9. Федченко Л.М., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В. Изменение основных климатических показателей в предгорной зоне северного Кавказа за период 1961–2022 гг. // Географический вестник. – 2024. – № 1(68). – С. 113–123. DOI: 10.17072/2079-7877-2024-1-113-123.
10. Чеченская Республика в цифрах. 2024: Краткий статистический сборник. Грозный: Чеченстат, 2024. – 148 с.
11. Шаповалов Д.А., Братков В.В., Савинова С.В., Ключин П.В. Динамика интегральных климатических показателей за 60 последних лет на территории Северного Кавказа // International Agricultural Journal. – 2022. – № 1. – С. 1–12.
12. Ahouissoussi N., Neumann J.E., Srivastava J.P. Building resilience to climate change in South Caucasus agriculture. World Bank Publications, 2014. – 140 p.
13. Baghirova S. The impact of climate change on the natural dendroflora of the greater Caucasus // In: BIO Web of Conferences. EDP Sciences. – 2025. – Vol. 151. – Art. No. 02006.
14. Gudko V., Usatov A., Minkina T., Tarigholizadeh S., Azarin K., Sushkova S., Dmitrieva A. Annual and seasonal precipitation dynamics in the South of Russia in the context of climate change // Theoretical and Applied Climatology. – 2024. – Vol. 155. – pp. 6177–6193. DOI: 10.1007/s00704-024-05005-6.
15. Kerimov I.A., Bratkov V.V., Bekmurzaeva L.R. Assessment of modern agroclimatic conditions of the North Caucasus in the context of climate change // In: International Scientific Conference “Complex Geophysical Monitoring in Georgia: History, Modern Problems, Promoting Sustainable Development of the Country”. Tbilisi: Publish House of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, 2024. – pp. 69–71.
16. Limareva N.S., Cabos W., Izquierdo A., Sein D.V. The climate change of the Caucasus as a result of the global warming // Modern Science and Innovation. – 2017. – No. 2. – pp. 15–26.
17. Rzaeva S., Guseynov J., Tagiyev A. Assessment of the impact of climate change on the precipitation regime in the southern slope of the Greater Caucasian province // Reliability: Theory and Applications. – 2023. – Vol. 18. No. 5(75). – pp. 404–410.
18. Shahgedanova M., Hagg W., Hassell D., Stokes C.R., Popovnin V. Climate change, glacier retreat, and water availability in the Caucasus region. Threats to global water security. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. – pp. 131–143.
19. Tashilova A.A., Ashabokov B.A., Kesheva L.A., Teunova N.V. Modern climate changes in the North Caucasus Region // In: Physics of the Atmosphere, Climatology and Environmental Monitoring. – 2022. – pp. 289–297.
20. Vinogradova V., Gracheva R., Belonovskaya E. Climate change effects on mountain Regions Marginalized by socio-economic transformation – the case of North Caucasus // In: Nature, Tourism and Ethnicity as Drivers of (de)Marginalization: Insights to Marginality from Perspective of Sustainability and Development. Springer International Publishing, 2017. – pp. 79–90.

References

1. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Tashilova A.A., Kesheva L.A., Teunova N.V. Spatio-temporal climate change in the south of the European territory of Russia, assessment of its consequences, methods and models of adaptation of the agro-industrial complex. Nalchik. Pechatnyj dvor. 2020. 476 p. (In Russ.)
2. Bekmurzaeva L.R., Bratkov V.V., Kerimov I.A. Assessment of modern agro-climatic conditions of the North Caucasus based on ground-based meteorological observations and low spatial resolution data. Vestnik SSUGT. 2025. Vol. 30. No. 6. pp. 27–35. DOI: 10.33764/2411-17592025-30-6-27-35. (In Russ.)

3. Volkov S.N., Savinova S.V., Cherkashina E.V., Shapovalov D.A., Bratkov V.V., Klyushin P.V. Assessment of current climate conditions changes in the territory of Ciscaucasia for the purposes of forecasting winter wheat yield. *South of Russia: Ecology, Development*. 2021. Vol. 16. No. 1. pp. 117–127. DOI: 10.18470/1992-1098-2021-1-117-127. (In Russ.)
4. Ermakova L.N., Tolmacheva N.I., Bezmaternyh E.A. Assessment of agro-climatic resources of the Perm Territory. *Geographical Bulletin*. 2010. No. 2(13). pp. 52–58. (In Russ.)
5. Kerimov I.A., Bratkov V.V., Bekmurzayeva L.R. Dynamics of agroclimatic indicators of steppe landscapes of the North Caucasus according to ground observations. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 219–230. DOI: 10.46698/VNC.2024.92.31.017. (In Russ.)
6. Petrushina M.N., Gunya A.N., Kolbovsky E.Yu., Purehovsky 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. DOI: 10.31857/S2587556623070130. (In Russ.)
7. USSR Climate Handbook. Issue 13. Part 2. Ed. V.F. Protsenko. Leningrad. Gidrometizdat. 1966. 492 p. (In Russ.)
8. The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary. Saint-Petersburg. Science-intensive Technologies. 2022. 124 p. (In Russ.)
9. Fedchenko L.M., Tashilova A.A., Kesheva L.A., Teunova N.V. Changes in the main climatic indicators in the foothill zone of the North Caucasus over the period 1961–2022. *Geographical Bulletin*. 2024. No. 1(68). pp. 113–123. DOI: 10.17072/2079-7877-2024-1-113-123. (In Russ.)
10. The Chechen Republic in numbers. 2024: A short statistical collection. Grozny. Chechenstat. 2024. 148 p. (In Russ.)
11. Shapovalov D.A., Bratkov V.V., Savinova S.V., Klyushin P.V. Dynamics of integral climatic indicators for the last 60 years in the territory of the North Caucasus. *International Agricultural Journal*. 2022. No. 1. pp. 1–12. (In Russ.)
12. Ahouissoussi N., Neumann J.E., Srivastava J.P. Building resilience to climate change in South Caucasus agriculture. *World Bank Publications*. 2014. 140 p.
13. Baghirova S. The impact of climate change on the natural dendroflora of the greater Caucasus. In: *BIO Web of Conferences*. EDP Sciences. 2025. Vol. 151. Art. No. 02006.
14. Gudko V., Usatov A., Minkina T., Tarigholizadeh S., Azarin K., Sushkova S., Dmitrieva A. Annual and seasonal precipitation dynamics in the South of Russia in the context of climate change. *Theoretical and Applied Climatology*. 2024. Vol. 155. pp. 6177–6193. DOI: 10.1007/s00704-024-05005-6.
15. Kerimov I.A., Bratkov V.V., Bekmurzaeva L.R. Assessment of modern agroclimatic conditions of the North Caucasus in the context of climate change. In: *International Scientific Conference “Complex Geophysical Monitoring in Georgia: History, Modern Problems, Promoting Sustainable Development of the Country”*. Tbilisi: Publish House of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University. 2024. pp. 69–71.
16. Limareva N.S., Cabos W., Izquierdo A., Sein D.V. The climate change of the Caucasus as a result of the global warming. *Modern Science and Innovation*. 2017. No. 2. pp. 15–26.
17. Rzaeva S., Guseynov J., Tagiyev A. Assessment of the impact of climate change on the precipitation regime in the southern slope of the Greater Caucasian province. *Reliability: Theory and Applications*. 2023. Vol. 18. No. 5(75). pp. 404–410.
18. Shahgedanova M., Hagg W., Hassell D., Stokes C.R., Popovnin V. Climate change, glacier retreat, and water availability in the Caucasus region. *Threats to global water security*. Dordrecht: Springer Netherlands. 2009. pp. 131–143.
19. Tashilova A.A., Ashabokov B.A., Kesheva L.A., Teunova N.V. Modern climate changes in the North Caucasus Region. In: *Physics of the Atmosphere, Climatology and Environmental Monitoring*. 2022. pp. 289–297.
20. Vinogradova V., Gracheva R., Belonovskaya E. Climate change effects on mountain Regions Marginalized by socio-economic transformation – the case of North Caucasus. In: *Nature, Tourism and Ethnicity as Drivers of (de)Marginalization: Insights to Marginality from Perspective of Sustainability and Development*. Springer International Publishing. 2017. pp. 79–90.

УДК 911.2

DOI: 10.46698/VNC.2026.69.88.001

Оригинальная статья

Оценка внутригодовой динамики полупустынных ландшафтов по данным дистанционного зондирования Земли

И.А. Керимов[✉], В.В. Братков[✉], Л.Р. Бекмурзаева[✉]

Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, 100,
e-mail: eip-eco2017@yandex.ru

Статья поступила: 12.02.2026, доработана: 25.05.2026, принята к публикации: 27.05.2026

Резюме: Актуальность работы. Оценка сезонной и внутригодовой динамики ландшафтов отображает их реакцию на происходящие изменения климатических условий. Однако не всегда имеются метеорологические данные, в связи с редкой метеосетью в некоторых регионах нашей страны. В этой связи, авторами предлагается проводить оценку внутригодовой динамики ландшафтов на основе индекса NDVI. **Цель** – оценка внутригодовой динамики полупустынных ландшафтов Чеченской Республики на основе индекса NDVI. **Материалы и методы.** Для расчетов спектральных индексов и температуры земной поверхности использовались снимки Landsat 8-9 второго уровня обработки (level 2), для которых проведена радиометрическая и геометрическая коррекция. Для вычисления спектральных/вегетационных индексов использовались соответствующие инструменты, имеющиеся в таких программах, как ArcGis, Qgis, ENVI и др. Были отобраны 17 безоблачных и малооблачных снимков за 2022–2024 гг. на все месяцы года. Растровые изображения, содержащие пространственное распределение спектрального/вегетационного индекса NDVI были классифицированы с шагом 0,1, что позволило выявить абсолютные и относительные площади его распространения в указанные даты, а также проследить его динамику в течение сезонов года. **Результаты.** Анализ изменения индекса NDVI показал, что динамику индекса достаточно рассматривать по грациям, а не по месяцам. Наиболее низкие значения NDVI = 0–0,1 связаны с окончанием периода активной вегетации. Наибольшие его значения приходятся на октябрь–декабрь. Значения NDVI в интервале 0,1–0,2 изменяются в наиболее широких пределах: от 0 % в декабре до 92,5 % в сентябре, так как максимальные значения данного индекса связаны с осадками, предшествующими периоду съемки. Значения NDVI в интервале 0,2–0,3, судя по их изменению в течение года, более тесно связаны с фенологическими фазами развития растительности, в связи с чем максимальные их показатели приходятся на весну, а минимальные – на осень. **Выводы.** Индекс NDVI может быть использован в качестве вспомогательного при изучении внутригодовой или сезонной динамики ландшафтов, особенно в районах с разреженной метеорологической сетью.

Ключевые слова: индекс NDVI, данные дистанционного зондирования Земли, полупустынные ландшафты, внутригодовая динамика ландшафтов, Landsat.

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания ГГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова FZNU-2024-0001 «Оценка влияния современных климатических изменений на природные и природно-антропогенные комплексы (на примере Чеченской Республики)».

Для цитирования: Керимов И.А., Братков В.В., Бекмурзаева Л.Р. Оценка внутригодовой динамики полупустынных ландшафтов по данным дистанционного зондирования Земли. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 198–208. DOI: 10.46698/VNC.2026.69.88.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.69.88.001

Original paper

Assessment of intraannual dynamics of semi-desert landscapes based on remote sensing data

I.A. Kerimov, V.V. Bratkov, L.R. Bekmurzaeva

Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov,
100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 364051, Russian Federation,
e-mail: eip-eco2017@yandex.ru

Received: 12.02.2026, revised: 25.05.2026, accepted: 27.05.2026

Abstract: Relevance. The assessment of seasonal and intraannual dynamics of landscapes reflects their reaction to the ongoing changes in climatic conditions. However, meteorological data is not always available due to the sparse meteorological network in some regions of our country. In this regard, the authors propose to evaluate the intraannual dynamics of landscapes based on the NDVI index. **The aim** is to assess of the intraannual dynamics of semi-desert landscapes of the Chechen Republic based on the NDVI index. **Materials and methods.** To calculate the spectral indices and temperature of the Earth's surface, Landsat 8-9 images of the second processing level (level 2) were used, for which radiometric and geometric corrections were performed. The programs ArcGIS, QGIS, ENVI, etc. were used to calculate spectral/vegetation indices. 17 cloudless and low-cloud images for 2022–2024 were selected for all months of the year. The bitmap images containing the spatial distribution of the NDVI spectral/vegetation index were classified in increments of 0.1, which made it possible to identify the absolute and relative areas of its distribution on the specified dates, as well as to trace its dynamics during the seasons. **Results.** An analysis of changes in the NDVI index showed that it is sufficient to consider the dynamics by gradation intervals, rather than by month. The lowest values of NDVI = 0–0.1 are associated with the end of the active growing season. Their highest values occur in October–December. NDVI values in the range of 0.1–0.2 vary most widely: from 0 % in December to 92.5 % in September, since the maximum values of this index are associated with precipitation preceding the survey period. The NDVI values in the range of 0.2–0.3, judging by their change during the year, are more closely related to the phenological phases of vegetation development, and therefore their maximum values occur in spring and their minimum values in autumn. **Conclusions.** The NDVI index can be used as an aid in studying the intraannual or seasonal dynamics of landscapes, especially in areas with a sparse meteorological network.

Keywords: NDVI index, Earth remote sensing data, semi-desert landscapes, intraannual landscape dynamics, Landsat.

Acknowledgments: *The work was carried out within the framework of the state task of the State Scientific Technical University named after. Academician M.D. Millionshchikova FZNU-2024-0001 “Assessment of the impact of modern climate change on natural and natural-anthropogenic complexes (using the example of the Chechen Republic)”.*

For citation: Kerimov I.A., Bratkov V.V., Bekmurzaeva L.R. Assessment of intraannual dynamics of semi-desert landscapes based on remote sensing data. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2026. 16(2): 198–208. DOI: 10.46698/VNC.2026.69.88.001

Введение

Под динамикой ландшафтов понимается как динамика природно-территориальных комплексов (ПТК) в течение сезонов года, так и смена состояний в течение какого-то отрезка времени. В основу сезонной динамики ландшафтов были положены работы Беручашвили [Беручашвили, 1989] о суточных состояниях ПТК – стексах. Их выделение производится на основе данных гидрометеорологической сети, при этом учитываются прежде всего термические условия, которые довольно легко связываются с тривиальными сезонами и подсезонами года (например, начало весны связано с температурами 0–5°C, конец осени – 5–0°C и т.п.). Далее при выделении состояний имеют значение условия увлажнения, которые выражаются через коэффициент увлажнения; для теплого периода он рассчитывается как отношение осадков к температуре. В зависимости от его величины спектр состояний изменяется от наиболее засушливых до наиболее влажных: аридные – семиаридные – семигумидные – гумидные. В холодное время года, помимо температуры воздуха, имеет значение снежный покров, в связи с чем выделяются либо нивальные состояния (при наличии снежного покрова, когда может происходить трансформация снежной толщи), либо криотермальные (отсутствие снежного покрова при отрицательных температурах воздуха). Еще одним критерием для выделения состояний ПТК являются тенденции изменения вертикальной структуры: она создается и разрушается в первый подсезон весны и последний подсезон осени; усложняется в разгар и окончание весны; упрощается в начале и разгаре осени. Что касается летних состояний, помимо традиционных подсезонов для изменения вертикальной структуры, большое значение имеют условия увлажнения: при гумидных условиях отмечается стабилизация структуры, а по мере проявления засухи и увеличения ее продолжительности вертикальная структура может упрощаться.

Методика оценки сезонной и внутригодичной динамики ландшафтов на основе метеорологических данных хорошо апробирована [Атаев и др., 2025; Атаев, Абдулаев, 2025; Бурым, 2012; Джандубаева, 2008; Керимов и др., 2024, 2025]. Однако не во всех типах ландшафтов имеется распространенная сеть метеорологических наблюдений. В связи с этим мы предлагаем проводить оценку внутригодичной динамики ландшафтов с использованием ГИС-технологий на основе индекса NDVI.

Применение индекса NDVI для различных территорий в пределах полупустынных ландшафтов рассматривается в ряде работ [Виноградова, Титкова, 2024; Гайсулов и др., 2023; Шинкаренко, Барталев, 2022, 2024; Юферев и др., 2022; Asam et al., 2025; Nabizada et al., 2025; Khan et al., 2026; Rousta et al., 2022; Isomov et al., 2025; Rajabov et al., 2022; Turymtayev et al., 2026].

Цель работы – оценка внутригодичной динамики полупустынных ландшафтов Чеченской Республики на основе индекса NDVI.

Методы исследования

Традиционно для оценки динамики ландшафтов посредством данных дистанционного зондирования Земли используются снимки в оптическом диапазоне, которые имеются в свободном доступе. Среди них чаще всего используются снимки среднего пространственного разрешения серии Landsat, имеющиеся на сайте Геологической службы США (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Их достоинством является наиболее максимально длинный, по сравнению с другими спутниками, ряд наблюдений. Кроме того, территория съемки одна и та же, в отличие, например, от спутников серии Sentinel-2, имеющих более короткие сроки съемки. Недостатком снимков данного спутника является относительно длинный интервал съемки (около 14 дней) одной и той же сцены. Общим недостатком оптических снимков является невозможность их использования при наличии облачности, поэтому, несмотря на кажущийся большой массив снимков, не все они могут быть использованы для тех или иных целей.

В настоящее время также сложились определенные представления в области теории и методики обработки и дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли. Их общая логика сводится к синтезу изображений в разных каналах для выявления тех или иных объектов. Чаще всего используется изображение в естественных цветах (RGB), которое характерно для зрительного восприятия человека. Оно является своеобразным эталоном, на основе которого возможно выделение интересных объектов (<http://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html#4-5-1>).

Вторым условным направлением обработки данных дистанционного зондирования Земли является вычисление на основе спектральных каналов различных индексов, в первую очередь вегетационных. В настоящее время наиболее широко используется нормализованный вегетационный индекс (NDVI), а также почвенный вегетационный индекс (SAVI).

Значения индекса NDVI находятся в диапазоне от -1 до 1. Общий диапазон для зеленой растительности составляет от -0,1 до 0,4.

Для оценки внутригодовой динамики ландшафтов необходимо было осуществить отбор космических снимков. Эта процедура сталкивается с тем, что не всегда изучаемая территория не покрыта облаками. Кроме того, имеется существенная разница в облачности по сезонам года: безоблачных снимков летом гораздо больше, чем в остальные сезоны года, особенно зимой и весной. Поскольку в силу изложенных причин нет возможности отобрать снимки в пределах только одного года, было отдано предпочтение снимкам за 2020–2024 гг., что позволило отобрать безоблачные или малооблачные снимки тестового полигона, адекватно отражающие изменения условий в рамках отдельных месяцев и сезонов года.

Говоря о сезонной динамике ландшафтов необходимо оговорить то обстоятельство, что съемка ведется в одно и то же время, в данном случае 07:35. Утренняя съемка не всегда полностью отражает термические условия, для которых характерен максимум после полуденного солнцестояния. Также в это время отмечается усиление испарения, что также может отражаться на спектральных отражательных свойствах компонентов ландшафтов.

Для расчетов спектральных индексов и температуры земной поверхности использовались снимки Landsat 8-9 второго уровня обработки (level 2), для которых проведена радиометрическая и геометрическая коррекция. Для вычисления спектральных/вегетационных индексов использовались соответствующие инструменты, имеющиеся в таких программах, как ArcGis, Qgis, ENVI и др.

Таким образом, для анализа внутригодовой динамики полупустынных ландшафтов были отобраны безоблачные снимки на все месяцы года за 2020–2024 гг. Согласно проведенному ранее анализу погодно-климатических условий [Керимов и др., 2024], наибольший интерес представляют весенние и ранние летние состояния, когда условия изменяются от гумидных к семигумидным и семиаридным, а также вторая половина лета, когда преобладают семиаридные и даже аридные состояния. Что касается зимних состояний, то они отличаются общей монотонностью на протяжении, как отмечалось выше, календарных зимних месяцев. Для последних практически отсутствуют безоблачные и даже малооблачные снимки.

В результате были отобраны 17 безоблачных и малооблачных снимков за 2022–2024 гг., которые позволяют адекватно оценить внутригодовую динамику ландшафтов в пределах тестового полигона на следующие даты: 01 марта 2024 г.; 23 марта 2023 г.; 18 апреля 2024 г.; 10 мая 2023 г.; 18 мая 2023 г.; 31 мая 2022 г.; 03 июня 2023 г.; 13 июня 2024 г.; 15 июля 2024 г.; 23 июля 2024 г.; 06 августа 2023 г.; 30 августа 2023 г.; 15 сентября 2023 г.; 23 сентября 2023 г.; 27 октября 2024 г.; 04 ноября 2024 г.; 14 декабря 2024 г.

Далее растровые изображения, содержащие пространственное распределение спектрального/вегетационного индекса NDVI были классифицированы с шагом 0,1,

что позволило выявить абсолютные и относительные площади его распространения в указанные даты, а также проследить его динамику в течение сезонов года.

Результаты исследования

Территория Чеченской Республики попадает в две сцены, которые не всегда можно корректно собрать в единую мозаику в связи с разным временем съемки, поэтому в пределах низменных и равнинных полупустынных и пустынных ландшафтов был выбран тестовый полигон, где отмечается минимальная антропогенная нагрузка. Здесь имеются немногочисленные мелкие населенные пункты. Кроме того, территория тестового полигона выходит за пределы Чеченской Республики в связи с тем, что там также распространены полупустынные и пустынные ландшафты с минимальным количеством населенных пунктов (рис. 1).

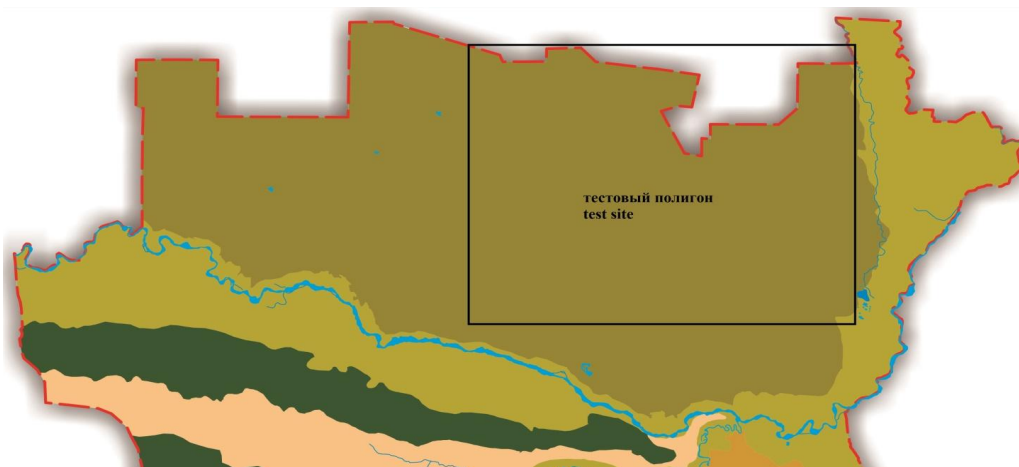


Рис. 1. Положение тестового полигона в пределах низменных и равнинных полупустынных и пустынных ландшафтов Чеченской Республики /

Fig. 1. The position of the test site within the low-lying and flat semi-desert and desert landscapes of the Chechen Republic

Рельеф в пределах данного ландшафта отличается генезисом и возрастом. Это выражается в наличии как форм, унаследованных от времен с другими условиями рельефообразования, так и современных. В настоящее время типичной формой рельефа являются грядовые пески. Чаще всего они простираются в широтном направлении в виде гряд высотой от 3–5 до 10–15 м. Гряды друг от друга разделены понижениями шириной от 100 м до 1,5 км. Эти гряды сформировались во время, когда климат был более засушливым [Рыжиков и др., 1991], то есть они являются элементами реликтового рельефа. В силу значительных современных скоростей ветра унаследованный рельеф подвергается переработке процессами перевеивания и развевания. В целом в пределах Притерского песчаного массива выделяются положительные (бугристо-грядовые и барханно-грядовые пески) и отрицательные (котловины выдувания) элементы рельефа. В целом для рельефа полупустынных ландшафтов на территории Чеченской Республики характерны высоты до 100 м и уклон в пределах 0–2°.

В связи с климатическими колебаниями, которые характерны для переходных зон, к которым относятся полупустынные ландшафты, здесь отмечаются стадии остепнения и опустынивания. Для первой характерно увеличение количества осадков, для второй – их сокращение, при этом термические условия не имеют существенного значения. Так, в 70-е годы XX века отмечалось снижение температуры воздуха при сокращении количества осадков (холодная и влажная фаза), что привело к усилению опустынивания. Наряду с климатическими факторами, в это время отмечалось уси-

ление антропогенной нагрузки в виде выпаса преимущественно мелкого рогатого скота, что усилило процесс климатического опустынивания и привело к увеличению площади песков. На рубеже веков и в первое десятилетие нынешнего века рост температуры воздуха сопровождался увеличением количества осадков, что в сочетании со снижением выпаса привело к увеличению доли степной растительности в пределах полупустынных ландшафтов: начался процесс зарастания песков. В настоящее время процесс потепления продолжается, и он сопровождается некоторым снижением количества осадков в последние 3–5 лет, что, опять же, способствует расширению ареала песков, практически лишенных растительности.

Что касается пространственного распределения растительного покрова, то здесь отмечается чередование степных ассоциаций, сформированных ксерофильными травянистыми многолетниками, с пустынными ксерофильными полукустарничками. При этом первые тяготеют к отрицательным формам рельефа, а вторые — к положительным. В результате выражено влияние микрорельефа. Даже при незначительных изменениях уровня поверхности отмечается существенная смена растительных группировок: от злаково-степных ассоциаций к полынным и солянковым.

Еще одним фактором, влияющим на распределение растительного покрова, является положение уровня грунтовых вод. Там, где они близко подходят к поверхности, формируется более плотный растительный покров.

Таким образом, с точки зрения спектральных отражательных свойств в пределах полупустынных ландшафтов выделяются прежде всего пески — как открытые, так и находящиеся в различных стадиях зарастания, — а также укоренившаяся растительность, приуроченная к относительно стабильным условиям увлажнения (подземные воды, отрицательные формы рельефа).

Изменение величины NDVI по месяцам и сезонам 2022–2024 гг. иллюстрирует таблица 1.

Таблица 1 / Table 1

**Изменение величины NDVI по месяцам и сезонам 2022–2024 гг. (в %) /
Change in the NDVI value by months and seasons 2022–2024 (in %)**

	01.03	23.03	18.04	10.05	18.05	31.05	03.06	13.06	15.07
-0,2--0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-0,1-0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0-0,1	7,3	2,1	1,2	1,5	1,5	0,9	1,9	1,1	3,7
0,1-0,2	81,6	42,8	36,4	29,0	39,8	22,2	69,1	45,9	89,0
0,2-0,3	11,0	48,0	60,9	65,6	57,0	71,9	27,8	51,0	6,9
0,3-0,4	0,0	7,1	1,5	3,7	1,7	4,8	1,0	1,8	0,4
0,4-0,5		0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0
0,5-0,6			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	23.07	06.08	30.08	15.09	23.09	27.10	04.11	14.12	
-0,2--0,1	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
-0,1-0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	
0-0,1	1,7	2,4	0,9	1,8	2,0	35,8	28,6	99,8	
0,1-0,2	76,5	74,2	74,7	92,5	89,0	63,8	71,1	0,0	
0,2-0,3	20,9	22,2	24,1	5,6	8,8	0,3	0,3		
0,3-0,4	0,8	1,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0		
0,4-0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0				
0,5-0,6	0,0	0,0							

Примечание: значения «0,0» соответствуют более низким величинам; пустые клетки соответствуют отсутствию данной градации в указанную дату / Note: values of “0,0” correspond to lower values; empty cells correspond to the absence of this gradation on the specified date.

Как видно из приведённых данных, на протяжении периода вегетации, который для данных ландшафтов характерен с марта по ноябрь месяцы, представлены градации NDVI 0,1–0,2 и 0,2–0,3, которые в целом соответствуют разреженной травянистой растительности. Остальные градации NDVI отражают сезонные особенности ее развития, обусловленные условиями тепло- и влагообеспеченности.

Значение NDVI, как одного из индикаторов сезонной динамики, существенно изменяется в течение года. Холодное время года, которое обычно в полупустынных ландшафтах длится с декабря по февраль, характеризуется тем, что надземная часть растительности, или надземная фитомасса, трансформируется в мортмассу, в результате чего величина NDVI приближается к минимальным положительным значениям, что характерно для 14 декабря, когда 99,8 % территории тестового полигона соответствуют значения 0–0,1, а на остальные градации приходится 0,2 %. В эти месяцы года в отдельные даты устанавливается неустойчивый снежный покров, типичный для февраля, в связи с тем, что в этом месяце повторяемость собственно восточных ветров составляет 41 %, а юго-западных, западных и северо-западных – 24 %.

В марте температура устойчиво переходит через +5°C и начинается вегетационный период, который наиболее чувствителен не столько к величине осадков, сколько к собственно температуре воздуха. В связи с этим наблюдаются следующие соотношения величин NDVI: если 1 марта на значения 0,0–0,1 приходится 7,3 %, то 23 марта – 2,1 %; на градацию 0,1–0,2 приходится соответственно датам 81,6 и 42,8 %, тогда как градация 0,2–0,3, соответствующая травянистой растительности, изменяется от 11,0 до 48,0 %. Кроме того, 23 марта достигает годового максимума градация NDVI 0,3–0,4 (7,1 %), которая связана, очевидно, с флорой, имеющей короткий жизненный цикл (эфмеры и эфемероиды).

В апреле, в связи с переходом температуры через +10°C начинается период активной вегетации, в связи с чем 60,9 % территории соответствуют значения NDVI 0,2–0,3, за счет продолжения сокращения площади со значениями NDVI 0,1–0,2. Также отмечается снижение площадей, которым соответствуют более высокие значения NDVI.

В мае завершается период сезонного развития растительности за счет того, что температура превышает +15°C, то есть устанавливается фенологическое лето и дальнейшие фенофазы в основном становятся обусловлены не столько температурными условиями, сколько увлажнением, зависящим от осадков. В результате сокращается площадь NDVI со значениями 0,1–0,2 (22,2 % 31 мая) за счет увеличения ее в градации 0,2–0,3 (до 71,9 % 31 мая). Некоторое снижение значений NDVI 0,2–0,3 18 мая можно объяснить снижением температуры воздуха в это время, что несколько затормозило фенологические фазы.

В июне, как уже отмечалось, начинает сказываться недостаток влаги, в результате чего 3 июня вновь увеличивается площадь NDVI с низкими значениями, но, очевидно в результате выпавших осадков к 13 июня вновь достигает широкого распространения NDVI=0,2–0,3.

Дальнейшие изменения в природных комплексах обусловлены не столько ростом температуры воздуха, сколько снижением количества осадков вследствие усиления трансформации воздушных масс из-за антициклональной погоды и усиления роли восточного переноса. К 15 июля, вследствие засухи основная часть тестового полигона (89 %) занята значениями NDVI=0,1–0,2. Но увеличение осадков во второй половине месяца и в целом в августе привело к тому, что площадь, приходящаяся на NDVI=0,2–0,3, составляла 21–24 % тестового полигона. То есть в это время (июль–август) отмечается стабильность условий, что проявляется в доминировании указанных градаций NDVI.

В сентябре усиливается засуха на фоне преобладания ветров восточных направлений, в результате чего сокращается доля вегетирующей растительности до 8–9 % ($NDVI=0,2-0,3$), а на основную часть полигона приходятся значения $NDVI=0,1-0,2$ (около 90 %).

В октябре и ноябре продолжается процесс завершения жизненного цикла растительности, в результате чего постепенно снижается площадь наиболее высоких значений $NDVI$ за счет увеличения площади наиболее низких. Тем не менее, 4 ноября значения $NDVI = 0,1-0,2$, которые в целом отражают весьма низкие запасы органического вещества, соответствуют 71 % территории.

Выводы

Таким образом, $NDVI$, являясь отражением запасов органического вещества в природно-территориальных комплексах, дает представление об их изменениях в течение года. Поскольку органическое вещество является центральным звеном природных комплексов, его динамика является выражением сезонной динамики ландшафта.

Как видно из представленных данных, в течение года всегда присутствует градация $NDVI = 0,1-0,4$, а ее среднее значение за целый год составляет 55,4 %. На градацию 0,2–0,3 приходится 34,5 %, а на градацию 0,0–0,1 приходится 9,5 %. Однако они существенно изменяются в течение года, при этом есть общая корреляция с $NDVI$. В этой связи можно ограничиться рассмотрением не столько помесечной динамики, сколько динамики разных градаций данного спектрального индекса.

Наиболее низкие значения $NDVI = 0-0,1$, на долю которых приходится 9,5 %, связаны с окончанием периода активной вегетации, поскольку в октябре и ноябре на них приходится 35,8 и 28,6 % соответственно, а в декабре – 99,8 %. В последнем случае они соответствуют наличию снежного покрова на данной территории, тогда как в предыдущих случаях, скорее всего это участки, на которых имеются водные поверхности, которые сокращают свои площади в теплое и сухое время года.

Значения $NDVI$ в интервале 0,1–0,2 изменяются в наиболее широких пределах: от 0 % в декабре до 92,5 % в сентябре. В этой связи максимальные значения данного индекса связаны с осадками, предшествующими периоду съемки, из-за чего показатели данного индекса практически идентичны $NDVI$. В целом данная градация соответствует влаге в растительном покрове и почве, обусловленной не столько фенологическими фазами, сколько предшествующими осадками и временем, прошедшим от момента их выпадения.

Значения $NDVI$ в интервале 0,2–0,3, судя по их изменению в течение года, более тесно связаны с фенологическими фазами развития растительности, в связи с чем максимальные их показатели приходятся на весну, а минимальные – на осень.

Таким образом, индекс $NDVI$ может быть использован в качестве вспомогательного при изучении внутригодовой или сезонной динамики ландшафтов, особенно в районах с разреженной метеорологической сетью.

Литература

1. Атаев З.В., Абдулаев К.А. Ландшафты северного макросклона Восточного Кавказа (Северо-восточный и Юго-восточный Кавказ) // Материалы II Международной научной конференции. Грозный: ГГНТУ, 2025. – С. 16–22.
2. Атаев З.В., Гюльмагомедов А.М., Джамалдинов Д.Ш., Зангиева М.Р., Нуралиев М.Э., Фролов Д.А., Хусаинов И.М., Шерифова З.Х. Сезонные изменения ландшафтов Кавказско-Каспийского региона под влиянием климатических факторов и колебаний современного уровня Каспийского моря // Известия Дагестанского государственного педагогиче-

ского университета. Естественные и точные науки. – 2025. – Т. 19. № 4. – С. 28–44. DOI: 10.31161/1995-0675-2025-19-4-28-44.

3. Беручашвили Н.Л. Этология ландшафта и картографирование состояний природной среды. Тбилиси: Изд-во ТГУ, 1989. – 196 с.

4. Бурым Ю.В. Анализ временной структуры степных ландшафтов Центрального Предкавказья с применением ГИС-технологий // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. – 2012. – № 3(32). – С. 71–75.

5. Виноградова В.В., Титкова Т.Б. Климатические предпосылки изменений границ ландшафтных зон и подзон в Европейской части России и Западной Сибири // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2024. – Т. 88. № 3. – С. 281–295. DOI: 10.31857/S2587556624030027.

6. Гайсумов Р.М., Атагаева М.Р., Сатуева Л.Л. Дешифрирование растительного покрова Наурского района Чеченской Республики с использованием индекса NDVI // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Грозный: ЧГУ, 2023. – С. 164–172. DOI: 10.36684/111-1-2023-164-171.

7. Джандубаева Т.З. Временная структура равнинно-холмистых ландшафтов Западного Предкавказья // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2008. – № 1(2). – С. 87–90.

8. 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. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 219–230. DOI: 10.46698/VNC.2024.92.31.017.

9. Керимов И.А., Братков В.В., Бекмурзаева Л.Р. Сезонная динамика ландшафтов Предкавказья как индикатор современных климатических изменений // Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы, секвестрационные технологии. Коллективная монография / Под ред. С.К. Гулёва, А.В. Ольчева. – М.: Научный мир, 2025. – С. 212–223.

10. Рыжиков В.В., Анисимов П.С., Самарский Г.Г., Газарьянц С.К., Голобуцкий А.А. Природа Чечено-Ингушской республики, ее охрана и рациональное использование. Грозный: Книга, 1991. – 160 с.

11. Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Анализ взаимосвязи структурных и спектрально-отражательных характеристик растительности аридных пастбищных ландшафтов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21. № 3. – С. 171–187. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-171-187.

12. Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Многолетняя динамика NDVI аридных пастбищных ландшафтов Европейской России и сопредельных территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2022. – Т. 19. № 6. – С. 108–123. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-108-123.

13. Юферов В.Г., Ткаченко Н.А., Синельникова К.П. Спектральные характеристики опустыненных пастбищ Черных Земель // Аридные экосистемы. – 2022. – Т. 28. № 1(90). – С. 65–72. DOI: 10.24412/1993-3916-2022-1-65-72.

14. Asam S., Schwarzenbacher F., Marshall Ingram D., Bachmann M. Detection of land degradation risk in Azerbaijan by combining fractional cover estimates based on DESIS data with multi-decadal Landsat NDVI trends // International Journal of Remote Sensing. – 2025. – pp. 1–32. DOI: 10.1080/01431161.2025.2536884.

15. Isomov A., Khabibullaev B.Sh., Shomurodov Kh.F., Beshko N.Yu., Kosimov Z.Z., Fayziev K.O., Abulfayzov Kh.Sh., Ibragimov H.R. Long-term NDVI trends and terrain characteristics in the natural ecosystem of the Nuratau nature reserve // Advances in Science and Environment. – 2025. Vol. 01. – pp. 10–16. DOI: 10.70728/envire.v01.i10.003.

16. Khan W., Jamal M.H.B., Hamed M.M., Muhammad M.K.I., Shahid Sh. Mapping agricultural drought hotspots in Pakistan: a remote sensing-based climate–vegetation nexus // Theoretical and Applied Climatology. – 2026. – Vol. 157. – pp. 157–180. DOI: 10.1007/s00704-026-06064-7.

17. Nabizada M.J., Koylu U., Rousta I. Assessing spatiotemporal dynamics of meteorological and agricultural drought in the North Basin of Afghanistan using multiple remote sensing-based

drought indices // International Journal of River Basin Management. – 2025. – pp. 1–27. DOI: 10.1080/15715124.2025.2528137.

18. Rajabov T.F., Ramsey R.D., Mardonov B.K., Nasirov M.G., Rakhimova T., Valiev S.A. Sensitivity of Landsat 7 & 8-derived vegetation indices on semi-arid rangelands of southwestern Uzbekistan // Geocarto International. – 2022. – Vol. 37. No. 2. – pp. 510–525. DOI: 10.1080/10106049.2020.1723715.

19. Rousta I., Mansourmoghaddam M., Olafsson H., Krzyszczyk J., Baranowski P., Zhang H., Tkaczyk P. Analysis of the recent trends in vegetation dynamics and its relationship with climatological factors using remote sensing data for Caspian Sea watersheds in Iran // International Agrophysics. – 2022. – Vol. 36. No. 3. – pp. 139–153. DOI: DOI: 10.31545/intagr/150020.

20. Turymtayev Zh., Ryskeldiyeva A., Tokbergenova A., Duisenbayev S., Salmurzauly R., Taukebayev O., Ussarov U., Smanov Zh. Spatiotemporal assessment of pastureland transformation and resilience in the Moiynkum Desert, Kazakhstan. ES Food and Agroforestry. 2026. Vol. 23. DOI: 10.30919/faf2093.

References

1. Ataev Z.V., Abdulaev K.A. Landscapes of the northern macroslope of the Eastern Caucasus (Northeastern and Southeastern Caucasus). In: Proceedings of the II International Scientific Conference. Grozny. GSOTU. 2025. pp. 16–22. (In Russ.)

2. Ataev Z.V., Gulmagomedov A.M., Dzhambaldinov D.Sh., Zangieva. M.R., Nuraliev M.E., Frolov D.A., Khusainov I.M., Sherifova Z.H. Seasonal changes in the landscapes of the Caucasian-Caspian region under the influence of climatic factors and fluctuations in the current level. Dagestan State Pedagogical University. Journal. Natural and Exact Sciences. 2025. Vol. 19. No. 4. pp. 28–44. DOI: 10.31161/1995-0675-2025-19-4-28-44. (In Russ.)

3. Beruchashvili N.L. Landscape ethology and mapping of natural environment conditions. Tbilisi. TSU. 1989. 196 p. (In Russ.).

4. Buryum Yu.V. Analysis of the temporal structure of steppe landscapes of the Central Ciscaucasia using GIS technologies. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2012. No. 3(32). pp. 71–75. (In Russ.)

5. Vinogradova V.V., Titkova T.V. Climatic prerequisites for changes of zonal and subzonal landscape boundaries in European Russia and Western Siberia. Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya. 2024. Vol. 88. No. 3. pp. 281–295. DOI: 10.31857/S2587556624030027 (In Russ.)

6. Gaysumov R.M., Atagaeva M.R., Satueva L.L. Decrypting of Naursky district's vegetation cover of the Chechen Republic using the NDVI index. In: Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists. Grozny. CSU. 2023. pp. 164–172. DOI: 10.36684/111-1-2023-164-171. (In Russ.).

7. Dzhandubayeva T.Z. The temporal structure of the flat-hilly landscapes of the Western Ciscaucasia. Dagestan State Pedagogical University. Journal. Natural and Exact Sciences. 2008. No. 1(2). pp. 87–90. (In Russ.)

8. 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. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 219–230. DOI: 10.46698/VNC.2024.92.31.017. (In Russ.)

9. Kerimov I.A., Bratkov V.V., Bekmurzayeva L.R. Seasonal landscape dynamics in the Ciscaucasia Region as an indicator of contemporary climate change. In: Carbon polygons: monitoring, geoinformation systems, sequestration technologies. Collective monograph. Eds. S.K. Gulev, A.V. Olchev. Moscow. Scientific World. 2025. pp. 212–223. (In Russ.)

10. Ryzhikov V.V., Anisimov P.S., Samarskiy G.G., Gazaryants S.K., Golobutskiy A.A. The nature of the Chechen-Ingush Republic, its protection and rational use. Grozny. Kniga. 1991. 160 p. (In Russ.)

11. Shinkarenko S.S., Bartalev S.A. Analysis of the relationship between the structural and spectral-reflective characteristics of vegetation in arid grassland landscapes. Sovremennyye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. 2024. Vol. 21. No. 3. pp. 171–187. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-171-187. (In Russ.)

12. Shinkarenko S.S., Bartalev S.A. Long-term arid pasture landscapes NDVI dynamics in European Russia and adjacent territories. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2022. Vol. 19. No. 6. pp. 108–123. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-108-123. (In Russ.)
13. Yuferev V.G., Tkachenko N.A., Sinelnikova K.P. Spectral characteristics of desertified Black-Earth pastures. *Arid Ecosystems*. 2022. Vol. 28. No. 1(90). pp. 65–72. DOI: 10.24412/1993-3916-2022-1-65-72. (In Russ.)
14. Asam S., Schwarzenbacher F., Marshall Ingram D., Bachmann M. Detection of land degradation risk in Azerbaijan by combining fractional cover estimates based on DESIS data with multi-decadal Landsat NDVI trends. *International Journal of Remote Sensing*. 2025. pp. 1–32. DOI: 10.1080/01431161.2025.2536884.
15. Isomov A., Khabibullaev B.Sh., Shomurodov Kh.F., Beshko N.Yu., Kosimov Z.Z., Fayziev K.O., Abulfayzov Kh.Sh., Ibragimov H.R. Long-term NDVI trends and terrain characteristics in the natural ecosystem of the Nuratau nature reserve. *Advances in Science and Environment*. 2025. Vol. 01. pp. 10–16. DOI: 10.70728/envire.v01.i10.003.
16. Khan W., Jamal M.H.B., Hamed M.M., Muhammad M.K.I., Shahid Sh. Mapping agricultural drought hotspots in Pakistan: a remote sensing-based climate–vegetation nexus. *Theoretical and Applied Climatology*. 2026. Vol. 157. pp. 157–180. DOI: 10.1007/s00704-026-06064-7.
17. Nabizada M.J., Koylu U., Rousta I. Assessing spatiotemporal dynamics of meteorological and agricultural drought in the North Basin of Afghanistan using multiple remote sensing-based drought indices. *International Journal of River Basin Management*. 2025. pp. 1–27. DOI: 10.1080/15715124.2025.2528137.
18. Rajabov T.F., Ramsey R.D., Mardonov B.K., Nasirov, M.G., Rakhimova T., Valiev S.A. Sensitivity of Landsat 7, 8-derived vegetation indices on semi-arid rangelands of southwestern Uzbekistan. *Geocarto International*. 2022. Vol. 37. No. 2. pp. 510–525. DOI: 10.1080/10106049.2020.1723715.
19. Rousta I., Mansourmoghaddam M., Olafsson H., Krzyszcak J., Baranowski P., Zhang H., Tkaczyk P. Analysis of the recent trends in vegetation dynamics and its relationship with climatological factors using remote sensing data for Caspian Sea watersheds in Iran. *International Agrophysics*. 2022. Vol. 36. No. 3. pp. 139–153. DOI: 10.31545/intagr/150020.
20. Turymtayev Zh., Ryskeldiyeva A., Tokbergenova A., Duisenbayev S., Salmurzauly R., Taukebayev O., Ussarov U., Smanov Zh. Spatiotemporal assessment of pastureland transformation and resilience in the Moiynkum Desert, Kazakhstan. *ES Food and Agroforestry*. 2026. Vol. 23. DOI: 10.30919/faf2093.

УДК 556.3 :556.334 : 477.61 : 622.6

DOI: 10.46698/VNC.2026.94.99.001

Оригинальная статья

Геоэкологические аспекты трансформации гидросферы на участках «мокрой» ликвидации угольных шахт (на примере шахты «Вергелевской»)

А.К. Коптева 

Донбасский государственный технический университет,
Россия, 294204, г. Алчевск, пр. Ленина, 16;

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М.И. Платова, Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132,
e-mail: alevtina.kopteva@bk.ru

Статья поступила: 04.03.2026, доработана: 01.06.2026, принята к публикации: 03.06.2026

Резюме: Актуальность работы. Ликвидация угледобывающих предприятий приводит к ухудшению геоэкологической ситуации, которая охватывает не только подработанное пространство, но и близлежащие территории. В результате прекращения ведения горных работ на шахте «Вергелевская» вблизи г. Луганска произошла трансформация подземной и поверхностной гидросферы. Это, в свою очередь, привело к изменению объема стока и значительным изменениям гидродинамических характеристик подработанного массива. В связи с этим возникает необходимость на примере шахты «Вергелевская» более точного определения характера трансформации гидросферы на участках ликвидации угольных шахт, осуществляемой способом затопления и оценить степень её влияния на геоэкологическое состояние горного массива, подземных и поверхностных водных объектов. **Цель исследования.** Установить характер трансформации гидросферы на участках «мокрой» ликвидации угольных шахт и оценить степень её влияния на геоэкологическое состояние горного массива, подземных и поверхностных водных объектов. **Материал и методы.** Материалом для настоящего исследования послужили результаты обследований и наблюдений, выполненных автором в 2024–2025 гг., а также данные из производственных отчетов геологических предприятий и отчетов «Главного управления реструктуризации шахт», литературные данные. Кроме стандартных методов геоэкологии, гидрогеологии, гидрологии и географии, использовались математические методы обработки спутниковых данных. **Результаты исследования.** Собраны и проанализированы данные по водопритокам и состоянию выходов подземных вод в шахтных выработках и карьерах, в том числе путем анализа спутниковых снимков поверхности Земли. Дана характеристика геомеханических процессов и гидрогеологических явлений на поле шахты «Вергелевская» в период с 1953 по 2025 годы. Выполнен анализ состояния обводненных породных массивов и гидродинамических изменений поверхностного и подземного стоков в условиях прекратившейся угледобычи. Установлено, что главным фактором трансформации породных массивов для рассматриваемой территории выступает обводненность. Сочетание открытого и закрытого способов отработки запасов угля в границах одного шахтного поля, которое по завершении угледобычи является саморегулируемой системой, приводит к созданию опасности случайного перераспределения подземных и поверхностных стоков.

Ключевые слова: ликвидация угольных шахт, трансформация гидросферы, подземный сток, поверхностный сток, шахта «Вергелевская».

Благодарности: Исследования выполнены за счет средств федерального бюджета (код темы: FRRU-2024-0004 в ЕГИСУ НИОКТР).

Для цитирования: Коптева А.К. Геоэкологические аспекты трансформации гидросферы на участках «мокрой» ликвидации угольных шахт (на примере шахты «Вергелевской»). *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 209–219. DOI: 10.46698/VNC.2026.94.99.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.94.99.001

Original paper

Geoecological aspects of hydrosphere transformation in the areas of “wet” coal mine liquidation (case study of the Vergelevskaya mine)

A.K. Kopteva 

Donbass State Technical University,
16 Lenin Ave, Alchevsk 294204, Russian Federation;
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132 Prosveshcheniya Str.,
Novocherkassk 346428, Russian Federation, e-mail: alevtina.kopteva@bk.ru

Received: 04.03.2026, revised: 01.06.2026, accepted: 03.06.2026

Abstract: Relevance. The liquidation of coal mining enterprises leads to a deterioration in the geo-ecological situation, which affects not only the mined-out area but also the surrounding territories. As a result of the cessation of mining operations at the Vergelevskaya mine near Lugansk, there has been a transformation of the underground and surface hydrosphere. This, in turn, has led to changes in the volume of runoff and significant alterations in the hydrodynamic characteristics of the mined-out massif. Therefore, it is necessary to determine more accurately the nature of the transformation of the hydrosphere in the areas of liquidation of coal mines using the flooding method, as exemplified by the Vergelevskaya mine, and to assess the extent of its impact on the geo-ecological state of the mountain massif, underground water bodies, and surface water bodies. **Aim.** The purpose of the study is to establish the nature of the transformation of the hydrosphere in the areas of “wet” liquidation of coal mines and to assess the extent of its impact on the geo-ecological state of the mountain massif, underground water bodies, and surface water bodies. **Material and methods.** The material for this study was obtained from the results of surveys and observations conducted by the author in 2024–2025, as well as from production reports of geological enterprises and reports of the Main Directorate for Mine Restructuring, and from literature data. In addition to standard methods of geo-ecology, hydrogeology, hydrology, and geography, mathematical methods of processing satellite data were also used. **Results.** Data on water inflows and the state of underground water outlets in mine workings and quarries were collected and analyzed, including through the analysis of satellite images of the Earth’s surface. The characteristics of geomechanical processes and hydrogeological phenomena in the Vergelevskaya mine field were provided for the period from 1953 to 2025. The state of water-saturated rock masses and the hydrodynamic changes in surface and underground runoff were analyzed in the context of the cessation of coal mining. It was established that the main factor in the transformation of rock masses in the area under consideration is water saturation. The combination of open-pit and underground mining methods within the same mine field, which is a self-regulating system after the cessation of coal mining, poses a risk of accidental redistribution of underground and surface runoff.

Keywords: liquidation of coal mines, transformation of the hydrosphere, underground runoff, surface runoff, Vergelevskaya mine.

Acknowledgements: The research was carried out at the expense of the federal budget (subject code: FRRU-2024-0004 at EGISU NIOKTR).

For citation: Kopteva A.K. Geoecological aspects of hydrosphere transformation in the areas of “wet” coal mine liquidation (case study of the Vergelevskaya mine). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 209–219. DOI: 10.46698/VNC.2026.94.99.001

Введение

Сравнительный анализ зарубежных и отечественных достижений в исследовании трансформации поверхностного и подземного стока на угледобывающих территориях показывает, что максимальный ущерб окружающей среде причиняет трансформация подземной и поверхностной гидросферы, а именно изменение и перераспределение поверхностного и подземного стока. Проблемами трансформации подземного и поверхностного стока Центрального Донбасса занимался ряд исследователей [Зубова, Зубов, 2008; Павлов и др., 2022; Долгих, 2025; Должиков и др., 2024 и др.].

Изучением угольных карьерно-отвальных комплексов северного склона Донецкого кряжа, их пространственных и динамических характеристик занимался В.В. Кандауров [2019].

Геоэкологические работы в сходных по геолого-гидрогеологическому строению угленосных районах выполнены в Ростовской области [Мохов, 2012, 2014, 2023; Закрыткин, 2023], на Урале [Рыбникова, Рыбников, 2018; Рыбников, Рыбникова, 2025; Рыбников и др., 2020] и в других регионах. Закономерностям трансформации гидродинамических характеристик горного массива угледобывающих территорий Китая посвящены работы [Chen, Mao, 2012; Li Chun-yi, 2008; Kul Si-ming, Li Chun-yi, 2009; Ji Changsheng, 2008; Ni et al., 2008; Dong et al., 2019].

Для получения более полной картины при изучении геомеханических процессов изменения горного массива, а именно коллекторских и фильтрационных свойств, важно использовать разнообразные косвенные данные. Гидрогеологические явления, возникающие в результате добычи угля, играют ключевую роль в анализе источников обводнения и водопритока. Соответственно, о геомеханической трансформации недр можно судить по изменениям подземной гидросферы, гидродинамическим свойствам массива, проявлениям подземных вод в горных выработках и на земной поверхности, а также другим данным. Ряд из них поддается вполне надежной геомеханической интерпретации с привлечением общегидрогеологических закономерностей [Мохов, 2014].

Материал и методы

В настоящем исследовании использованы результаты обследований и наблюдений, выполненных автором в 2024–2025 гг., а также материалы геологических отчетов треста «Ворошиловградуглегеология», производственных объединений «Кадиевуголь» и «Стахановуголь», фондовые материалы государственного унитарного предприятия «Главное управление реструктуризации шахт», материалы проекта затопления горных выработок ВОК и ТКП шахты «Никанор-Новая», выполненного в 2022 г., и другие производственные отчеты.

Кроме стандартных методов геоэкологии, гидрогеологии, гидрологии и географии, в настоящем исследовании использовались спутниковые методы. В частности, для создания схем расположения карьерно-отвальных комплексов выполнен мониторинг изменения состояния ландшафтов с помощью программного приложения «Google Планета Земля». Классификация спутниковых данных проводилась двумя способами: 1) визуальным – путём экспертного сравнения разновременных снимков; 2) путём измерений с использованием компьютерных программ, включающих широкий спектр методов для идентификации, описания и количественного определения изменений между изображением одной и той же территории в разное время. В результате измерения площади и протяженности карьерно-отвальных комплексов и сравнения их с общей площадью водосбора и протяжённостью речной сети получены показатели площадного и линейного коэффициента ландшафтных изменений.

Результаты и обсуждение

Шахта «Вергелевская» расположена в пгт Вергулевка, вблизи г. Луганска, в 5 км к северо-западу от г. Дебальцево. Поле шахты находится на водоразделе рек Лозовая и Санжаровка (рис. 1). Сдана в эксплуатацию в 1956 г. Разрабатывала пласты l_6^g , l_5 , l_4^g и была закрыта в марте 2020 г. Гидрогеологические наблюдения за уровнем подземных вод на поле закрытой шахты «Вергелевская» в настоящий момент не ведутся. Водоотливной комплекс отсутствует.

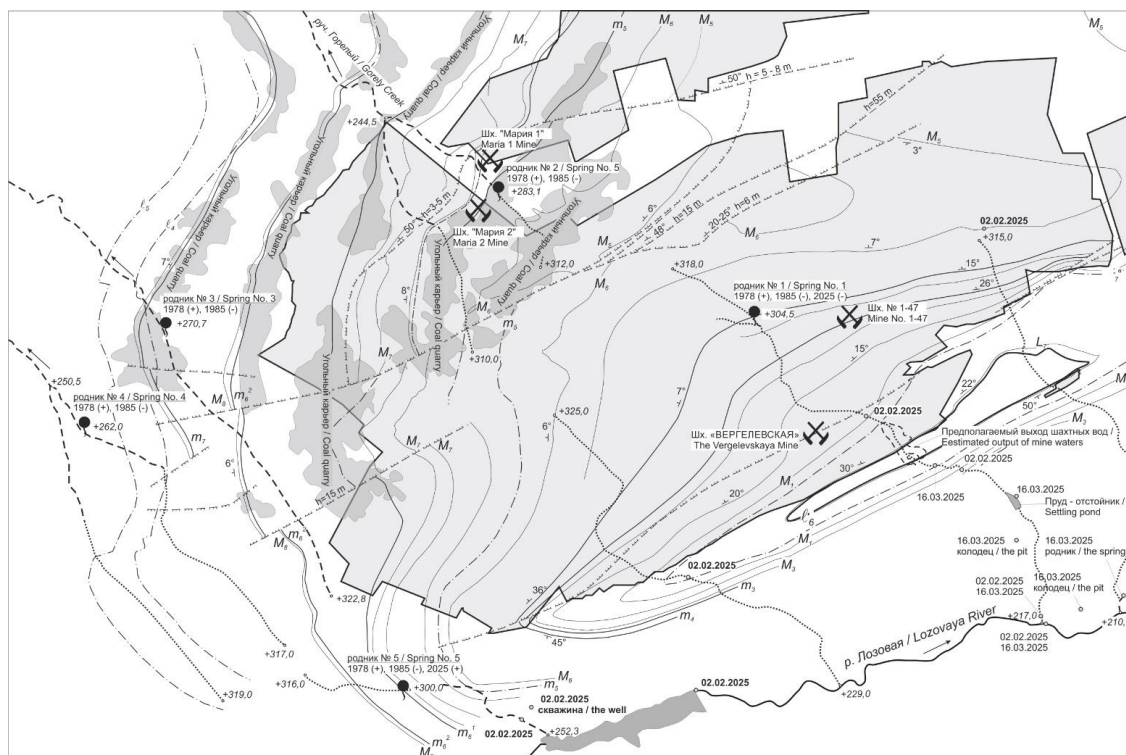


Рис. 1. Карта-схема поля закрытой шахты «Вергелевская» /
Fig. 1. Map diagram of the field of the closed mine "Vergelevskaya"

Влияние подземной разработки на обводненность горного массива

Наращение с годами общего притока по шахте «Вергелевская» отражает расширение дрены с тенденцией к стабилизации и в целом коррелирует с многолетней динамикой показателя среднегодового количества осадков за период 1966–2019 гг. Линия тренда количества осадков представлена на рисунке 2.

Данные отчетов свидетельствуют об увеличении водопритока по угольному пласту l_5 и уменьшении водопритока по пластам l_4^g и l_6^g с 2013 г. (рис. 2).

Оценка состояния поверхностных водных объектов

Одним из способов оценки техногенного воздействия и последствий прошлых и текущих углеработок является оценка состояния поверхностных водных объектов и иных водопоявлений на полях закрытых шахт.

По состоянию на 1953 г. на период разведки Вергелевского участка в отчете о геологоразведочных работах отмечалось, что гидрографическая сеть на его территории развита весьма слабо.

Гидрогеологической съемкой, выполненной в 1976 г., было установлено отсутствие выходов на дневную поверхность подземных вод и слабое развитие гидрографической сети. На ситуационной карте масштаба 1:5 000 отмечен родник № 1 –

в границах ведения горных работ и родники № 2-5 – в границах горного отвода закрытой шахты «Вергелевская», но за границами ведения горных работ (рис. 1).

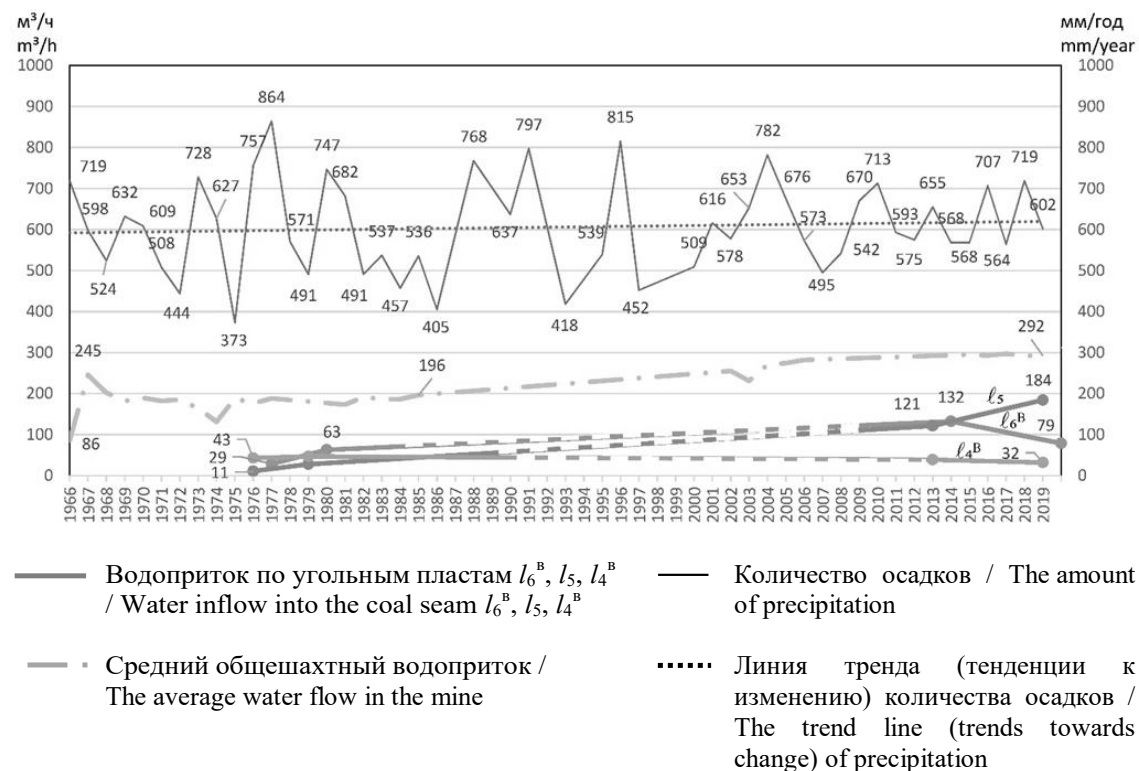


Рис. 2. График изменения среднего общешахтного водопитока и водопитока по пластам закрытой шахты «Вергелевская» за период 1966–2019 гг. /

Fig. 2. Graph of changes in the average total water intake and water inflow across the strata of the closed "Vergel'evskaya" mine for the period 1966–2019

По результатам топографической съемки масштаба 1:10 000, проведенной в 1980-х гг., на топографической карте не обозначено ни одного из ранее описанных родников на поле закрытой шахты «Вергелевская».

Места вероятного выхода шахтных вод и родники на поле закрытой шахты «Вергелевская» были обследованы 02.02.2025 г. и 16.03.2025 г. Выходов шахтных вод не обнаружено.

Родник № 1 находился в границах ведения горных работ закрытой шахтой № 1-47 на поле шахты «Вергелевская». Шахта отрабатывала пласт угля m_3 в 1955–1958 гг. на абсолютной отметке +255,5 мБС (глубина подработки в районе родника 53 м). В 1959 г. шахта № 1-47 была закрыта.

Появление информации о роднике № 1 в отчете по состоянию на 1976 г. связано с залегающими выше угольного пласта m_3 обводненными известняками и песчаниками, которые после затопления закрытой шахты № 1-47, отрабатывавшей угольный пласт m_3 на небольшой глубине, восстановили свою водообильность и стали питать родник № 1.

В 1983 г. подвигание забоя по угольному пласту l_5 происходило на абсолютной отметке +19,9 мБС вблизи родника № 1, что стало одной из причин его высыхания.

Топографической съемкой масштаба 1:10 000 по состоянию на 1985 г. зафиксировано отсутствие родника № 1.

По состоянию на 2025 г. родник № 1 не восстановился.

Родник № 2 (абсолютная отметка +283,1 мБС) находится в зоне влияния горных работ закрытых шахт «Мария I» и «Мария II», обрабатывавших угольный пласт m_5 в довоенный период. Информация об этих шахтах не сохранилась.

Родник № 2 не отмечен в отчете о геологоразведочных работах 1953 г., но был показан в отчетах по состоянию на 1976 г., что связано, очевидно, с затоплением выработанного пространства закрытых шахт «Мария I» и «Мария II».

Значительная глубина разработки пласта l_6^g и отдаленность от места расположения родника № 2 позволяют отрицать связь между этим водным объектом и горными выработками шахт «Вергелевская» и «Ломоватская».

По состоянию на 2025 г. родник № 2 засыпан в ходе отработки угольного пласта m_5 открытым способом; вскрытый водоносный горизонт сформировал обводненный карьер в 100 м к северо-востоку от бывшего родника № 2.

Таким образом, состояние поверхностных водных объектов можно оценить как неудовлетворительное. Гидрографическая сеть на поле закрытой шахты «Вергелевская» была развита весьма слабо в период разведки участка Вергелевского в 1953 г. и доразведки в 1976 и 1978 гг. Появление родников № 1 и № 2 в 1976 г., отмеченных на топографической карте масштаба 1:10 000 (1980-е гг.), было связано с затоплением выработанного пространства закрытой шахты № 1-47 и закрытых шахт «Мария I» и «Мария II». Ближайшие действующие родники находятся за границами поля закрытой шахты «Вергелевская».

Оценка влияния количества осадков на обводненность поля закрытой шахты «Вергелевская»

Особенности формирования стока на водосборной площади и перемещения воды в пределах речной сети реализуются в виде статистических зависимостей прогнозируемого значения от гидрологических и метеорологических характеристик [Beven, 2020; Borsch et al., 2022].

Согласно результатам аналитического сглаживания годовой суммы осадков в г. Дебальцево, где расположена ближайшая метеостанция, выполненного в отчете «Оценка водно-ресурсного потенциала и факторов, влияющих на его формирование в Луганской Народной Республике» (Крамаренко А.А., Лысенко И.Л., Коптева А.К. – Луганск: Минприроды ЛНР, 2021. – 379 с.), в 1948–1954 гг. зафиксирован маловодный период, во время которого выпадало в среднем 393 мм/год атмосферных осадков (рис. 3).

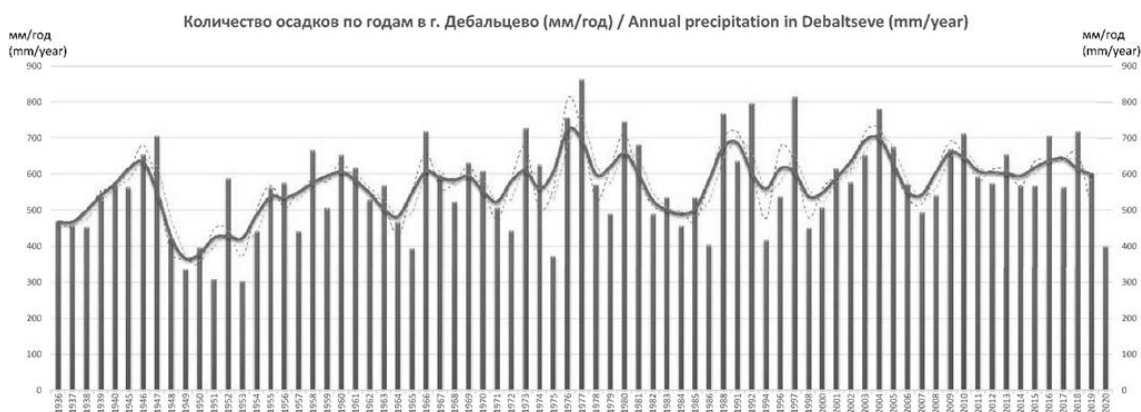


Рис. 3. Графическое представление результатов аналитического сглаживания годовой суммы осадков в г. Дебальцево (среднее значение – 571 мм в год) /

Fig. 3. Graphical representation of the results of analytical smoothing of the annual precipitation in Debaltseve (average value – 571 mm per year)

Учитывая тот факт, что родники №№ 1, 2, 3, 4, 5 не были подработаны в ходе подземной отработки запасов угля на поле шахты «Вергелевская» по состоянию на 1953 г., их отсутствие на момент проведения гидрогеологического обследования Вергелевского участка, описанного в геологическом отчете за 1953 г., связано с длительным маловодным периодом, продлившимся с 1948 по 1954 год.

Таким образом, водность родников на поле закрытой шахты «Вергелевская» до начала ведения горных работ (1953 г.) находилась в прямой зависимости от количества осадков.

В маловодный период в середине 80-х гг. XX века родники, скорее, находились в вероятностной зависимости как от количества осадков, так и от величины подземного питания за счет подземных вод затопленного выработанного пространства закрытой шахты № 1-47 и закрытых шахт «Мария I» и «Мария II».

Оценка состояния поверхности шахтного поля по спутниковым снимкам

Одним из способов оценки техногенного воздействия и последствия прошлых и текущих углеработок в условиях отсутствия данных гидрогеологических наблюдений является оценка состояния поверхности Земли по данным космоснимков сервиса «Google Планета Земля».

Родники №№ 2, 3 и 4. По состоянию на 2024–2025 гг. обследование северной части поля закрытой шахты «Вергелевская» затруднено. В связи с этим обследование родников №№ 2, 3 и 4 не проводилось. Однако анализ космоснимков сервиса «Google Планета Земля» позволяет оценить последствия открытой разработки угля в границах горного отвода закрытой шахты «Вергелевская».

Ретроспективный анализ данных сервиса «Google Планета Земля» свидетельствует, что с 2005 г. началась активная разработка залежей каменного угля открытым способом в бассейне реки Санжаровка, в верховьях ручья Горелого, в северной части горного отвода закрытой шахты «Вергелевская». Угольные карьеры и траншеи вытянутой конфигурации по выходам пластов m_5 , m_5^1 , m_6^1 , m_6^2 , m_7 в период 2005–2013 гг. сформировали карьерно-отвальные комплексы в верховье ручья Горелого, которые проходят через места расположения родников №№ 2 и 3. Выработками вскрыты водоносные горизонты, вследствие чего на всем протяжении карьеры и траншеи обводнены (см. рис. 1).

Между водоносными горизонтами угольных карьеров, отработывавших пласты m_5 , m_5^1 , m_6^1 , m_6^2 , m_7 , и выработанным пространством закрытой шахты «Вергелевская», отработывавшей пласты l_6^e , l_5 , l_4^e и m_3 (шахта № 1-47), гидрогеологическая связь отсутствует.

Карьерно-отвальные комплексы обладают характерной морфологической структурой, которая определяется свойствами вскрышных и добычных пород, геологическим строением и техникой ведения разработок угля [Кандауров, 2019]. В верховьях ручья Горелого карьерно-отвальные комплексы имеют преимущественно линейно-вытянутую конфигурацию в соответствии с выходами на поверхность угольных пластов, при этом карьеры и траншеи перпендикулярно пересекают как ручей Горелый, так и его притоки. Тем самым отвалы и карьерно-отвальные комплексы нарушают естественный сток поверхностных вод, их дренирование в нижележащие водоносные горизонты и формируют на водосборной площади ручья Горелого альтернативную гидросеть (рис. 1).

Отдельное внимание следует уделить линейному коэффициенту ландшафтных изменений (отношение протяженности карьерно-отвальных комплексов к протяженности гидросети) ручья Горелого, который составляет 235,1 %. Протяженность карьерно-отвальных комплексов в 2,35 раза превышает протяженность постоянных

водотоков ручья Горелого. Особенностью данных карьерно-отвальных комплексов является то, что практически все угольные карьеры вскрыли водоносные горизонты и являются постоянно обводненными.

Родник № 5. По результатам обследования 02.02.2025 г. за границами ведения горных работ закрытой шахты «Вергелевская» находится родник № 5. Качество воды удовлетворительное, признаки шахтных вод отсутствуют.

Таким образом, земная поверхность в северной части горного отвода закрытой шахты «Вергелевская» в бассейне реки Санжаровка, в период 2005–2013 гг. подверглась значительному техногенному влиянию. Отношение площади карьерно-отвальных комплексов к площади гидрографической единицы «водосбор ручья Горелого» (площадной коэффициент ландшафтных изменений) составляет 17,8 %.

Активная разработка залежей по выходу пласта каменного угля открытым способом привела к формированию карьерно-отвальных комплексов линейно-вытянутой конфигурации, нарушающих естественный поверхностный и подземный сток. Обводненные карьеры сформировали на площади водосбора ручья Горелого альтернативную гидросеть, в 2,35 раза более протяженную, чем гидросеть ручья Горелого.

Заключение

В настоящее время горный массив поля закрытой шахты «Вергелевская» является сложным вследствие сочетания открытого и закрытого способа отработки запасов угля в границах одного шахтного поля, а также является саморегулируемым в условиях прекратившейся угледобычи.

Систематические гидрогеологические наблюдения за уровнем подземных вод на поле закрытой шахты «Вергелевская» не ведутся. В данном случае использование косвенной гидрогеологической информации, полученной в ходе наблюдений за состоянием выходов подземных вод, шахтных выработок и карьеров по отработке запасов угля открытым способом, а также анализ космоснимков поверхности Земли открывают возможности для более точного определения характера трансформации гидросферы на участках «мокрой» ликвидации угольных шахт и оценки степени её влияния на геоэкологическое состояние горного массива, подземных и поверхностных водных объектов.

Из-за особенностей геологического строения шахты «Вергелевская» её территория в субширотном направлении разделена на северную и южную части, отделенные Никаноровским II надвигом. В южной части уголь добывался подземным способом в период 1956–2020 гг., в то время как в северной части использовались открытые горные работы в период 2005–2013 гг. Этот факт указывает на значительную гидравлическую разобщенность между этими участками.

Учитывая наличие пустотного пространства по нескольким отработанным пластам, проявление провалов на отдельных участках, отсутствие водопроявлений, можно сделать вывод о том, что на поле закрытой шахты «Вергелевская» сформировались безводные зоны. Однако, учитывая тот факт, что закрытая шахта «Вергелевская» прекратила работу только в 2020 г., насыщение массива водой будет продолжаться.

Вследствие разработки залежей по выходу пласта каменного угля открытым способом на поле закрытой шахты «Вергелевская» в период 2005–2013 гг. были образованы линейно-вытянутые карьерно-отвальные комплексы, нарушающие естественный поверхностный и подземный сток. Особенностью данных карьерно-отвальных комплексов является то, что практически все они постоянно обводнены, в то время как естественные выходы подземных вод прекратили существование и не оказывают влияния на водность временных водотоков.

Подробный анализ состояния обводненных породных массивов и гидродинамических изменений поверхностного и подземного стоков может быть применен к водосборным территориям, подверженным схожему антропогенному влиянию.

Литература

1. Долгих В.П. Оценка применимости моделей машинного обучения для прогноза гидроэкологического состояния малых рек // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 3. – С. 148–161. DOI: 10.46698/VNC.2025.82.17.001.
2. Должиков П.Н., Леонов А.А., Пронская Н.В. Факторы активизации деформаций породного массива закрытых шахт // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 1. – С. 493–502.
3. Закруткин В.Е., Решетняк В.Н., Гибков Е.В., Скляренко Г.Ю. Аутигенные минералы железа в речных отложениях Восточного Донбасса // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 102–118. DOI: 10.46698/VNC.2023.95.74.008.
4. Зубова Л.Г., Зубов А.Р. Гидроэкологические проблемы Донбасса: учебное пособие. Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2008. – 100 с.
5. Кандауров В.В. Пространственные и динамические характеристики сети угольных карьерно-отвальных комплексов у пгт. Бугаевка Перевальского района Луганской Народной Республики // Вестник Луганского национального университета им. Тараса Шевченко. Серия 5. География. Экономика. Туризм. – 2019. – № 1(25). – С. 4–8.
6. Мохов А.В. Гидравлические аспекты режима гидросферы на полях угольных шахт (на примере Восточного Донбасса) // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 191–199. DOI: 10.46698/VNC.2023.93.35.015.
7. Мохов А.В. Гидродинамическая эволюция пустотного пространства каменноугольных шахт под влиянием затопления // Вестник Южного научного центра РАН. – 2012. – Т. 8. № 3. – С. 42–49.
8. Мохов А.В. Подземные воды как индикатор геомеханических процессов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 3. – С. 274–282.
9. Павлов В.И., Кусайко Н.П., Сергейчук О.В. Климатические особенности формирования стока малых рек ЛНР // Экологический вестник Донбасса. – 2022. – № 4. – С. 31–40.
10. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Гидрогеологические исследования в горном деле на постэксплуатационном этапе // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2018. – № 4. – С. 25–39. DOI: 10.1134/S0869780318040105.
11. Рыбников П.А., Рыбникова Л.С. Геофильтрационное обоснование водно-балансовых составляющих водосбора ликвидируемых угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2025. – № 1-1. – С. 193–207. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_193.
12. Рыбников П.А., Рыбникова Л.С., Максимович Н.Г., Деменев А.Д. Исследование гидрогеологических условий угольных месторождений на постэксплуатационном этапе с использованием гидродинамического моделирования (на примере Кизеловского угольного бассейна, Западный Урал, Россия) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3-1. – С. 475–487. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-475-487.
13. Beven K. Deep study, hydrological processes and the uniqueness of the place // Hydrological Processes. – 2020. – Vol. 34. Issue 16. – pp. 3608–3613. DOI: 10.1002/presumably13805.
14. Borsch S., Simonov Yu., Khristoforov A., Semenova N., Koliy V., Ryseva E., Glozhintsev V., Deryugina V. Forecasting the flow of Russian rivers by hydrographic extrapolation // Hydrology. – 2022. – Vol. 9. DOI: 10.3390/hydrology9010001.
15. Chen F., Mao D. The mutual influence of mining and fault activation // Coal Mining Technology. – 2012. – No. 1. – pp. 15–21.
16. Dong S., Xu B., Yin S., Han Y., Zhang X., Dai Z. Use and protection of water resources in the coal mining area in northern China // Nature. Scientific Reports. – 2019. – Vol. 9. Art. No. 1214. DOI: 10.1038/s41598-018-38148-4.

17. Ji Changsheng. On the development of open-pit coal mining systems in China // *Journal of Mining and Safety Engineering*. – 2008. – No. 3. – pp. 297–300.
18. Kul Si-ming, Li Chun-yi. The effect of a weak plane on surface movement and intermittent deformation // *Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition)*. – 2009. – No. 2. – pp. 1–4.
19. Ni X., Wang Y., Jie M. The influence of stresses in various tectonic positions on the morphology of the fracture internode // *Journal of the Chinese Coal Society*. – 2008. – No. 5. – pp. 505–508.

References

1. Dolgikh V.P. Assessment of the applicability of machine learning models for forecasting the hydroecological state of small rivers. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 3. pp. 148–161. DOI: 10.46698/VNC.2025.82.17.001. (In Russ.)
2. Dolzhikov P.N., Leonov A.A., Pronskaya N.V. Factors of activation of deformations of the rock mass of closed mines. *News of the Tula State University. Sciences of Earth*. 2024. No. 1. pp. 493–502. (In Russ.)
3. Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N., Gibkov E.V., Sklyarenko G.Yu. Authigenic Iron Minerals in River Sediments of the Eastern Donbass. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 102–118. DOI: 10.46698/VNC.2023.95.74.008. (In Russ.)
4. Zubova L.G., Zubov A.R. *Hydroecological Problems of Donbas: textbook*. Lugansk. V. Dal National University. 2008. 100 p. (In Russ.)
5. Kandaurov V.V. Spatial and dynamic characteristics of the network of coal mining and dumping complexes near the village. Bugayevka, Perevalsky district, Luhansk People's Republic. *Bulletin of Taras Shevchenko Luhansk National University. Series 5. Geography. Economy. Tourism*. 2019. No. 1(25). pp. 4–8. (In Russ.)
6. Mokhov A.V. Hydraulic aspects of the hydrosphere regime in the fields of coal mines (on the example of Eastern Donbass). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 191–199. DOI: 10.46698/VNC.2023.93.35.015. (In Russ.)
7. Mokhov A.V. Hydrodynamic evolution of the void space of carbon coal mines under the influence of flooding. *Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012. Vol. 8. No. 3. pp. 42–49. (In Russ.)
8. Mokhov A.V. Underground water as indication of geomechanical processes. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2014. No. 3. pp. 274–282. (In Russ.)
9. Pavlov V.I., Kusayko N.P., Sergeychuk O.V. Climatic Features of the Formation of the Flow of Small Rivers in the LPR. *Ecological Bulletin of Donbas*. 2022. No. 4. pp. 31–40. (In Russ.)
10. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Hydrogeological research in mining at the post-operational stage. *Geoecology, Engineering Geology, Hydrogeology, and Geocryology*. 2018. No. 4. pp. 25–39. DOI: 10.1134/S0869780318040105. (In Russ.)
11. Rybnikov P.A., Rybnikova L.S. Fluid flow modeling to determine water balance in catchments during coal mine closure. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2025. No. 1-1. pp. 193–207. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_19_3. (In Russ.)
12. Rybnikov P.A., Rybnikova L.S., Maksimovich N.G., Demenev A.D. Hydrogeology of the Kizel coal basin (Western Urals, Russia) in post-mining stage: the main problems and ways of their solution. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2020. No. 3-1. pp. 475–487. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-475-487. (In Russ.)
13. Beven K. Deep study, hydrological processes and the uniqueness of the place. *Hydrological Processes*. 2020. Vol. 34. Issue 16. pp. 3608–3613. DOI: 10.1002/presumably13805.
14. Borsch S., Simonov Yu., Khristoforov A., Semenova N., Koliy V., Ryseva E., Glozhintsev V., Deryugina V. Forecasting the flow of Russian rivers by hydrographic extrapolation. *Hydrology*. 2022. Vol. 9. DOI: 10.3390/hydrology9010001.
15. Chen F., Mao D. The mutual influence of mining and fault activation. *Coal Mining Technology*. 2012. No. 1. pp. 15–21.

16. Dong S., Xu B., Yin S., Han Y., Zhang X., Dai Z. Use and protection of water resources in the coal mining area in northern China. *Nature. Scientific Reports*. 2019. Vol. 99. Art. No. 1214. DOI: 10.1038/s41598-018-38148-4.

17. Ji Changsheng. On the development of open-pit coal mining systems in China. *Journal of Mining and Safety Engineering*. 2008. No. 3. pp. 297–300.

18. Kul Si-ming, Li Chun-yi. The effect of a weak plane on surface movement and intermittent deformation. *Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition)*. 2009. No. 2. pp. 1–4.

19. Ni X., Wang Y., Jie M. The influence of stresses in various tectonic positions on the morphology of the fracture internode. *Journal of the Chinese Coal Society*. 2008. No. 5. pp. 505–508.

УДК: 504.05

DOI: 10.46698/VNC.2026.85.43.001

Оригинальная статья

Породные отвалы угледобывающих предприятий как элемент городской среды населённых пунктов Восточного Донбасса (на примере г. Шахты Ростовской области)

Г.Ю. Скляренко[✉], Г.Р. Шехурдин[✉], А.В. Наставкин[✉]

Институт наук о Земле Южного федерального университета, Россия, 344090,
г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 40, e-mail: gysklyarenko@sfedu.ru,
geo-szx@yandex.com, nastavkin@sfedu.ru

Статья поступила: 05.03.2026, доработана: 29.05.2026, принята к публикации: 01.06.2026

Резюме: Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения сложившейся роли породных отвалов угледобывающей отрасли в городских экосистемах Восточного Донбасса. Это необходимо в целях определения рациональных направлений освоения и рекультивации территорий, подвергшихся техногенному преобразованию. Территория Донецкого каменноугольного бассейна представляет собой область накопленного экологического ущерба. Он связан с длительной историей промышленной разработки угольных месторождений, преимущественно шахтным способом. Отдельный вклад был внесён последовавшей реструктуризацией горнодобывающей отрасли, которая повлекла массовое закрытие шахт без проведения полного комплекса сопутствующих работ. **Целью исследования** является определение масштабов воздействия существующего комплекса породных отвалов угольной промышленности, расположенных в пределах городского округа Шахты – крупнейшего населённого пункта Восточного Донбасса и одного из центров Восточно-Донбасской городской агломерации. **Методы** включают интерпретацию данных дистанционного зондирования Земли, построение геоинформационной системы данных на основе спутниковых и картографических материалов, визуальное и расчетное определение параметров отдельных породных отвалов, а также выполнение вычисления ориентировочного объёма делювия для идентифицированных объектов. В качестве **материалов исследования** были использованы данные открытых источников, включая данные мультиспектральной съёмки и спутниковые снимки естественного цвета, топографические карты и открытые базы геоинформационных данных. **Результаты.** В ходе исследования были определены основные направления воздействия породного отвала на окружающий урболандшафт. Они включают как непосредственное физическое и химическое воздействие, так и изменение пространственной структуры города, её приспособление к формам техногенного рельефа. Также значение имеют факторы, связанные с эстетическим восприятием отвалов в городской среде и их историческим значением для шахтерского региона. Идентифицированы существующие отвалы угольной отрасли в пределах городского округа Шахты Ростовской области. Определены такие их характеристики как площадь, конфигурация, наличие развитого растительного покрова, степень целостности и проведение рекультивации как путём ликвидации, так и с сохранением техногенного рельефа. Определены ориентировочные объёмы техногенного выноса материала для трёх групп породных отвалов в городской черте и выделены связанные с ними факторы риска.

Ключевые слова: Восточный Донбасс, Ростовская область, породные отвалы, техногенные ландшафты, урбоэкосистема.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00768, <https://rscf.ru/project/25-27-00768/>.

Для цитирования: Скляренко Г.Ю., Шехурдин Г.Р., Наставкин А.В. Породные отвалы угледобывающих предприятий как элемент городской среды населённых пунктов Восточного Донбасса (на примере г. Шахты Ростовской области). *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 220–231. DOI: 10.46698/VNC.2026.85.43.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.85.43.001

Original paper

Coal mining slagheaps as a component of urbanized landscapes in the Eastern part of Donets coal basin (for example, Shakhty city district, Rostov region)

G.Yu. Sklyarenko^{ORCID}, G.R. Shehurdin^{ORCID}, A.V. Nastavkin^{ORCID}

Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, 40 R. Zorge Str.,
Rostov-on-Don 344090, Russian Federation,
e-mail: gysklyarenko@sfedu.ru, geo-szx@yandex.com, nastavkin@sfedu.ru

Received: 05.03.2026, revised: 29.05.2026, accepted: 01.06.2026

Abstract: The relevance of this research is determined by the need to study the current role of coal mining slag heaps within the urban ecosystems of the Eastern part of Donets coal basin. It is important for the rational development and reclamation of territories and landscapes that have undergone technogenic transformation and environmental impact. The territory of the Donets coal basin is a region of accumulated environmental damage, which is caused by the long-lasting industrial development of coal deposits, mainly by underground mining. An additional impact was made by the subsequent restructuring of the coal mining industry, which led to the closure of many coal mines without carrying out a full range of reclamation works. **The aim** of the study is to determine the extent of the impact of the existing coal industry slag heaps located within the Shakhty city district, which is the largest settlement in the Eastern part of Donets coal basin and one of the centers of the Eastern Donets urban agglomeration. **The methods** include interpreting remote sensing data, constructing a geoinformatic system based on satellite and cartographic materials, visual and computational determining of the parameters of individual slag heaps, and calculating of the approximate deluvium volume for objects identified. Open source data, including multispectral and true colour satellite imagery, topographic maps, and open geoinformation databases, were used as **research materials**. **Results.** The main forms of environmental impact of slag heaps on the urban landscape were identified including direct physical and chemical impact and changes in the spatial city structure, its adaptation to anthropogenic relief. The factors related to the aesthetic role of slag heaps in the urban environment and their historical significance for the mining region are also important. Existing coal industry slag heaps within the Shakhty city district have been identified. Their characteristics, such as area, configuration, presence of developed vegetation cover and reclamation status have been determined.

Keywords: Eastern Donets coal basin, Rostov region, coal slag heaps, technogenic landscapes, urban ecosystems.

Acknowledgements: This study was supported by grant No. 25-27-00768 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/25-27-00768/>.

For citation: Sklyarenko G.Yu., Shehurdin G.R., Nastavkin A.V. Coal mining slagheaps as a component of urbanized landscapes in the Eastern part of Donets coal basin (for example, Shakhty city district, Rostov region). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 220–231. DOI: 10.46698/VNC.2026.85.43.001

Введение

Восточный Донбасс – один из старейших центров развития угольной отрасли Восточной Европы. О существовании здесь запасов каменного угля было известно ещё во время правления Петра I, а коммерческая разработка месторождений ведётся с середины XIX столетия.

Будучи сформированными вокруг угледобывающих предприятий, города Восточного Донбасса несут на себе отпечаток своей производственной специализации. Таков и город Шахты, образовавшийся на месте открытых в 1839 году Грушевских рудников. На его территории располагается множество породных отвалов, как сохранившихся после сворачивания советского угледобывающего комплекса, так и унаследованных от наиболее старых шахт Области Войска Донского.

В настоящее время терриконы и отвалы – неотъемлемая черта городского ландшафта рассматриваемого населённого пункта. Они расположены во всех его районах и занимают сотни гектаров площади, формируя рельеф наравне с его естественными формами. Часть отвалов подвергается полной ликвидации с дальнейшим использованием материала в хозяйственных целях, часть же – более сложной рекультивации с сохранением общих характеристик «искусственного холма» и формированием почвенно-растительного покрова [Шяймартдянов, 2018].

Урболандшафтная роль породных отвалов

Несмотря на однозначную техногенность породных отвалов («терриконов») горной промышленности, их наличие в урбоэкосистеме нельзя оценивать исключительно в контексте негативного воздействия на окружающую среду. Такие объекты выступают уникальной особенностью шахтёрских городов и при развитии в них современной городской среды могут выполнять, в том числе, и экологическую роль в качестве характерного элемента таких природно-антропогенных территориальных комплексов. Основные аспекты геоэкологического значения породных отвалов представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Экологическая роль породного отвала в пределах урбоэкосистемы / Environmental significance of slagheaps within urban ecosystem

Направление воздействия на урбоэкосистему / Aspect of ecosystem impact	Содержание / Meaning
1. Механическое воздействие / Mechanic impact	1.1. Загрязнение атмосферного воздуха взвешенными веществами (пылью, в т.ч. угольной) вследствие дефляционного выноса / Atmospheric air pollution by particulate matter (dust, including coal dust) due to deflation [Kucbel et al., 2025]. 1.2. Воздействие на механические свойства почв и грунтов при использовании материала отвала в хозяйственных целях / Impact on the mechanical properties of soils and grounds when using the slagheap material for economic purposes.
2. Физическое воздействие / Physical impact	2.1. Формирование аномалий радиационного фона вследствие природной радиоактивности пород отвала (в т.ч. при использовании его материала в хозяйственных и иных целях) [Бураева и др., 2026] / Formation of radiation background anomalies due to the natural radioactivity of the slagheap rock material (including when its material is used for economic and other purposes) [Buraeva et al., 2026]. 2.2. Искажение теплового поля города вследствие: а) тепловых свойств пород отвала и его нагрева солнечной энергией; б) эндогенного горения в теле отвала [Шехурдин, Склярёнок, 2024] / Distortion of the city's thermal field due to: a) the thermal properties of the dump's rocks and its heating by solar energy; b) endogenous combustion in the slagheap's body [Shekhurdin, Sklyarenko, 2024].

3. Химическое воздействие / Chemical impact	3.1. Химическое загрязнение атмосферного воздуха: а) продуктами дефляционного выноса (параллельно с механическим воздействием); б) продуктами эндогенного горения [Сочилин и др., 2023] / Chemical air pollution: a) caused by deflation products (in parallel with mechanical impact); b) caused by endogenous combustion products [Sochilin et al., 2023]. 3.2. Химическое загрязнение поверхностных и грунтовых вод: а) с поверхностным стоком; б) с фильтратом, прошедшим через тело отвала; в) при осаждении продуктов дефляционного выноса и эндогенного горения [Мохов, 2024] / Chemical water pollution: a) with surface runoff; b) with filtrate that has passed through the slagheap body; c) during the deposition of deflationary and endogenous combustion products [Mokhov, 2024]. 3.3. Химическое загрязнение почв: а) с поверхностным стоком; б) при осаждении продуктов дефляционного выноса и эндогенного горения; в) с загрязнёнными природными водами; г) при использовании материала отвала в хозяйственных и иных целях [Калаева и др., 2016; Невидомская и др., 2021] / Chemical soil contamination: a) from surface runoff; b) from the deposition of deflationary and endogenous combustion products; c) from contaminated natural water; d) from the use of spoil material for economic and other purposes [Kalaeva et al., 2016; Nevidomskaya et al., 2021]/
4. Биоэкологическое воздействие / Bioecological impact	4.1. Формирование промышленной пустыни в окрестностях отвала вследствие негативного воздействия на компоненты окружающей среды / Industrial desert (wasteland/brownfield) formation near the slagheap due to the negative impact on environmental components. 4.2. Породный отвал как потенциальный элемент структуры экологического каркаса города (при его рекультивации посредством озеленения, лесонасаждения, террасирования и т.д.) / Coal slagheap as a potential element of the city's ecological framework structure (during its reclamation through landscaping, afforestation, terracing, etc.)
5. Геоморфологическое и ландшафтообразующее воздействие / Geomorphological impact and landscape formation	5.1. Породный отвал как антропогенная форма рельефа, препятствующая развитию гомогенной городской среды: а) препятствующая развитию транспортных связей и застройки; б) способствующая развитию экологического каркаса города (при его рекультивации посредством озеленения, лесонасаждения, террасирования и т.д.) / Coal slagheap as an anthropogenic landform that hinders the development of a homogeneous urban environment: a) hinders the development of transport links and construction; b) contributes to the development of the city's environmental network (through reclamation: landscaping, afforestation, terracing, etc.).
6. Эстетическая роль / Aesthetic role	6.1. Породный отвал как элемент неоднородности городского ландшафта, препятствующий негативному влиянию гомогенной искусственной среды на психоэмоциональное здоровье человека (при включении в структуру экологического каркаса города) / Slagheap as an element of the urban landscape's heterogeneity, preventing the negative impact of a homogeneous artificial environment on human psychoemotional health (when included in the city's environmental network) [Szewczyk-Swiatek, 2025].

7. Социальная роль / Social role	7.1. Антропогенные формы рельефа как уникальная историко-культурная и экологическая особенность населённого пункта – потенциальный фактор эколого-, историко- и промышленно-туристической привлекательности / Anthropogenic landforms as a unique historical, cultural, and ecological feature of a settlement, and a potential factor for the development of ecological, historical, industrial tourism [Ghosh, 2021; Rohaendi et al., 2022]. 7.2. Породный отвал как возможный элемент экологического каркаса города с возможным рекреационным значением / Slagheap as a possible element of the city's ecological framework with possible recreational value.
----------------------------------	--

Рациональная рекультивация породных отвалов и прилегающих техногенно-нарушенных территорий (промышленных пустынь) предусматривает ликвидацию основных негативных последствий воздействия углепромышленного комплекса на ландшафт и воссоздание растительного (в т.ч. древесного) покрова [Krzyszowska-Waitkus, 2022; Rouhani, 2023]. Преобразованные таким образом объекты могут рассматриваться как элемент экологического каркаса населённого пункта, в совокупности с имеющимися участками условно-природных и природно-антропогенных ландшафтов, лесными насаждениями и рекреационными зонами [Лобов, Гоженко, 2018].

Альтернативным (и широко применяющимся на Восточном Донбассе) подходом к решению проблем, связанных с породными отвалами, является ликвидация последних посредством их разборки и вторичного использования материала в хозяйственных и иных целях [Артемов, 2025]. К областям применения отвальных пород, в частности, относятся отсыпка дорог, производство строительных материалов и заполнение отрицательных форм рельефа [Восковых, 2023; Павлова, Зубов, 2025]. Оправданность таких мероприятий, несмотря на их некоторую коммерческую значимость, вызывает определённые вопросы. «Окончательное решение проблемы» сопряжено с усугублением негативных экологических последствий, главным образом физико-химического характера, обусловленным расширением пространственного распределения материала отвала, в частности, и фактическим возвращением на индустриальную, техногенную стадию формирования ландшафта в целом.

Объект исследования

Город Шахты расположен в восточной части Ростовской области, в пределах восточной части Донецкого угольного бассейна. Площадь города составляет порядка 16 тыс. га при населении 219 тыс. человек. Климат города влажный континентальный с жарким летом (Dfa по Кёппену – Гейгеру) [Peel et al., 2007]. Максимальные летние температуры достигают 40 °C при небольшом количестве осадков в тёплый период (180 мм при среднегодовой величине 450 мм).

В социально-экономическом отношении город является крупнейшим населённым пунктом Восточно-Донбасской конурбации (полицентрической агломерации), сформировавшейся вокруг основных центров развития угледобычи региона. Ближайшие города – Новошахтинск (101,7 тыс. чел.) и Красный Сулин (35,7 тыс. чел.). Исходная горнопромышленная специализация города, однозначно главенствовавшая до 1994 года, в настоящее время уступила место многочисленным предприятиям вторичного и третичного секторов экономики. Несмотря на наблюдающуюся динамику оттока населения, Шахты сохраняют инвестиционную привлекательность благодаря большой численности трудоспособного населения, благоприятному географическому и транспортному положению. По итогам рейтинговой оценки эффективности де-

тельности городских округов (2022 г.) город занимает второе место по Ростовской области, уступая соседнему Новошахтинску.

Особенностью объекта исследования является существенная пространственная неоднородность городской ландшафтной среды, что обусловлено формированием единого населённого пункта из ряда поселений различных исторических периодов: казачьих хуторов Поповка, Максимовка, Власовка; шахтёрских поселений советского времени при шахтах (им. Фрунзе, Октябрьской революции, Южная и т.д.); посёлков Артём и Аютинский.

Границы городского округа в значительной мере условны и носят формально-административный характер. Пространственно-территориальное размещение промышленных объектов и селитебных зон в большей степени обуславливается здесь геологическими, ландшафтными и хозяйственно-экономическими факторами, в то время как административное включение той или иной территории в городской округ не всегда увязывается с её сформировавшимися пределами.

В настоящее время добыча каменного угля в городе и его окрестностях не производится, шахты и разработки закрыты (главным образом т.н. «мокрым способом» – с естественным затоплением выработок подземными и грунтовыми водами). Однако объекты добывающих производств до сих пор играют важную роль в формировании городского ландшафта. На территории населённого пункта расположено большое количество горных выработок, размещены многочисленные породные отвалы (терриконы). Часть породного материала, богатого угольной пылью, размещается вне отвалов, главным образом тяготея к объектам транспортной и промышленной инфраструктуры, что обусловлено его использованием в хозяйственных и иных целях.

Материалы и методы исследования

В целях идентификации породных отвалов на территории города Шахты было произведено картографирование данной категории объектов с привлечением следующих источников данных:

- материалы спутниковой съёмки земной поверхности от Института исследования систем окружающей среды (англ. Environmental Systems Research Institute (ESRI));
- материалы мультиспектральной космической съёмки ИСЗ серии Landsat, широко используемые в геоэкологических исследованиях техногенно-преобразованных регионов и применяемые в качестве источника данных для дистанционного мониторинга углепромышленных территорий по всему миру [Duo et al., 2024; Nafees et al., 2022];
- открытые данные OpenStreetMap, представленные свободно распространяемым набором векторных данных, создаваемых пользователями проекта;
- топографические и тематические карты различных лет.

Особый интерес в контексте рассмотрения негативного воздействия на состояние окружающей среды населённого пункта представляет рассмотрение поступления в неё материала отвалов в форме делювиальных отложений (путём смыва с поверхности). Величина объёма смыва при этом может использоваться для оценки некоторых видов воздействия (в частности, химического и механического), главным образом на почвы, поверхностные и грунтовые воды. В данной работе был применён подход к определению величины стока, уже использовавшийся на территории Донецкого каменноугольного бассейна (в районе г. Лисичанск) [Скляренко и др., 2017]. Необходимо отметить, что в основе произведённых расчётов в значительной мере лежит метод аналогии, основанный на принятии во внимание схожести условий формирования и минерального состава породных отвалов Донецкого бассейна. Поэтому полученные результаты рассматриваются как ориентировочная величина и могут быть откоррек-

тированы при дальнейшей детализации и уточнении. Также стоит заметить, что источниками рассматриваемого материала служат отвалы, не подвергнутые разборке или рекультивации, отличающиеся сохранением изначальной структуры и несформированным почвенно-растительным покровом. Такие объекты достаточно хорошо идентифицируются с привлечением материалов космической съёмки в естественном цвете и мультиспектральных данных.

Результаты исследования

По результатам идентификации породных отвалов было выявлено 64 объекта данной категории в пределах городского округа Шахты. Из них в настоящее время 45 не подвергнуты рекультивации или ликвидации. 34 объекта представляют собой типичные терриконы конической формы либо группы таковых, объединённые приуроченностью к одному предприятию (как правило, шахте).

Были выделены три основных района сосредоточения породных отвалов на территории города: центральная часть населённого пункта, а также бывшие посёлки Артём, Аютинский и Таловый (см. рис. 1).

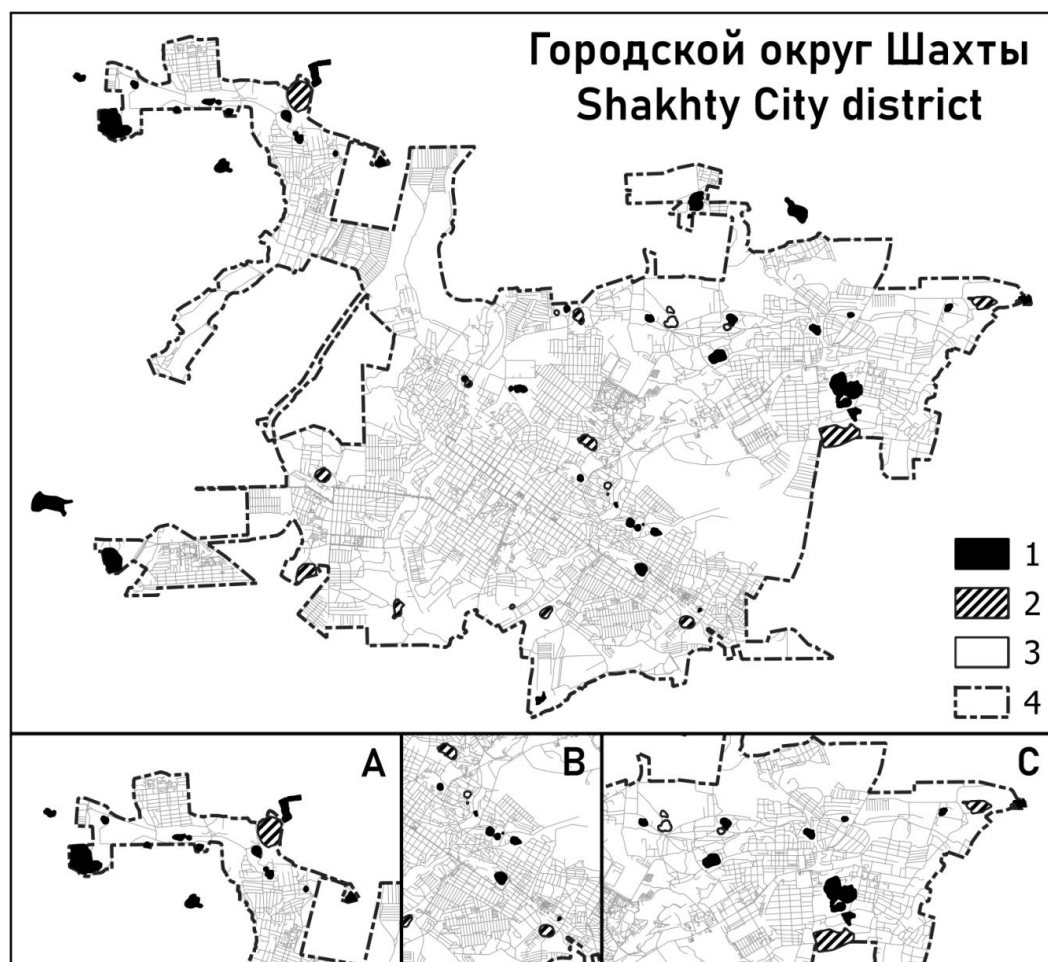


Рис. 1. Основные породные отвалы на территории городского округа Шахты: 1 – существующие; 2 – рекультивированные; 3 – ликвидированные; 4 – граница городского округа. А – породные отвалы бывших посёлков Аютинский и Таловый; В – группа породных отвалов в центре города; С – породные отвалы бывшего посёлка Артём /

Fig. 1. Slagheaps distribution map of Shakhty city district. Slagheaps: 1 – non-reclaimed; 2 – reclaimed; 3 – eliminated. 4 – City district borders. Locations of heap groups: A – Former Ayutinskiy and Taloviy townships; B – city centre area; C – former Artem township

Для каждого из них определялась величина смыва техногенного материала. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 /Table 2

**Основные характеристики групп породных отвалов городского округа Шахты /
General characteristics of main slagheap groups in Shakhty city district**

Обозначение (рис. 1) / Designation (Fig. 1)	Место расположения / Location	Количество отвалов / Number of slagheaps	Общая площадь, занятая отвалами, га/ Total area occupied by slagheaps, ha	Ориентировочная величина многолетнего смыва, т / Estimated long- term deluvium value, t
A	Бывшие посёлки Аютинский и Таловый / Former Ayutinskiy and Taloviy townships	14	81,95	259 477,4
B	Центральная часть города / City centre area	7	13,67	43 297,6
C	Бывший посёлок Артём / Former Artem township	14	141,05	446 588,0

Наибольшую роль отвалы угольной промышленности играют в формировании городской среды обитания в пределах бывшего шахтёрского посёлка Артём, где сосредоточено 14 существующих объектов воздействия, общей площадью более 140 га. Необходимо отметить, что фактическая величина многолетнего поступления техногенного материала здесь может быть существенно выше полученных данных, что обусловлено существованием ряда других отвалов, в настоящее время ликвидированных, подвергшихся рекультивации или разборке. Рассматриваемый район также является территорией, где производится целенаправленное привнесение материала отвалов в окружающую среду вследствие их использования, прежде всего, в дорожном строительстве. Разбираются в целях хозяйственного использования и ранее озеленённые отвалы, например террикон шахты имени Артёма, на котором ранее был сформирован устойчивый растительный покров из древесно-кустарниковых пород.

Северо-запад города (территория посёлков Таловый и Аютинский) также подвержен воздействию объектов существовавшего здесь угледобывающего комплекса. Необходимо отметить, что техногенные формы рельефа здесь расположены в окружении условно-природных и агроландшафтов, а жилая застройка является малоэтажной и достаточно разрозненной. По территории района проходит русло реки Аюта и многочисленных балок – её притоков. Многие из них находятся в непосредственной близости от терриконов, что обуславливает риск загрязнения поверхностных и грунтовых вод, а также донных отложений.

Группа отвалов в центральной части города, приуроченная к районам бывших посёлков Октябрьский, Воровского, 20-летия РККА и шахты «Пролетарская диктатура», представляет наибольший интерес с природоохранной точки зрения. Все объекты данной группы располагаются в непосредственной близости к жилым домам и местам скопления людей. Среди них отдельно следует выделить террикон шахты № 16(26), находящийся на берегу реки Грушевка, а также отвал вблизи железнодорож-

ной станции Грушевский Антрацит, являющийся, согласно материалам дистанционного зондирования, мощным источником распространения угольной пыли.

Групповое расположение породных отвалов в Шахтах (в отличие, например, от соседнего Новошахтинска) в контексте развития городской среды возможно рассматривать как определённое преимущество в отношении пространственного развития населённого пункта. Оно обуславливает возможность более эффективной организации обращения с ними, в том числе – в целях формирования протяжённых элементов «экологического каркаса территории», направленного как на минимизацию негативного техногенного воздействия, так и на организацию уникального городского ландшафта. В то же время следует отметить, что, в настоящее время, на территории города Шахты популярным способом решения проблемы терриконов является их полная ликвидация с использованием материала в хозяйственных и иных целях. Будучи (в некоторых условиях) экономически обоснованным, такой подход приводит к однозначному увеличению объемов поступающих в урболандшафт загрязняющих веществ, а также к развитию вторичного загрязнения атмосферного воздуха, почвенного покрова и водных объектов.

Заключение

По итогам проделанной работы можно сделать следующие основные выводы:

1. Породные отвалы горной промышленности играют важную роль в формировании урбоэкосистем в угледобывающих районах. Они выступают элементами формирования современного техногенного рельефа территории и организации пространственного развития функциональных зон города.

2. Геоэкологическая роль породных отвалов заключается как в их непосредственном воздействии на все компоненты урболандшафта, так и в формировании разнообразных антропогенных экосистем, приуроченных к данным объектам. В зависимости от характера хозяйственного освоения территории и уровня развития рационального природопользования посттехногенные экосистемы отвалов могут изменяться от «промышленных пустынь» до элементов «экологического каркаса» населённого пункта.

3. Наибольшее воздействие породных отвалов на территории городского округа Шахты (в отношении поступающего техногенного материала) наблюдается в границах бывшего посёлка Артём. Район бывших посёлков Аютинский и Таловый также отличается высокой концентрацией источников такого воздействия, что, однако, частично компенсируется удалённостью основной части селитебной зоны от отвалов. Центральная часть города в меньшей степени подвержена поступлению загрязняющих веществ по причине техногенного смыва, что обусловлено меньшей площадью источников воздействия, рекультивацией и ликвидацией части терриконов.

Породные отвалы угледобывающей отрасли являются характерной чертой шахтёрских городов и посёлков, определяющей их внешний облик и геоэкологические особенности. Выступая источниками негативного воздействия на состояние окружающей среды, они, тем не менее, представляют определённый интерес в роли важных элементов экологической, социокультурной и исторической среды Восточного Донбасса.

Литература

1. Артемов И.А. Минералого-петрографическая зональность горелых горных отвалов угольных шахт (Восточный Донбасс) // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 2. – С. 155–165. DOI: 10.46698/VNC.2025.14.75.001.
2. Бураева Е.А., Шишлов И.В., Кузнецова К.А., Бобылев В.А., Качусов Д.А., Шаповалов Е.С., Ратушный В.И., Ермолаева Н.В. Радиационная обстановка в районах Ростовской области с различной антропогенной нагрузкой // Вестник Национального исследователь-

ского ядерного университета «МИФИ». – 2026. – Т. 15. № 1. – С. 91–104. DOI: 10.26583/vestnik.2026.1.8.

3. Восковых К.А. Воздействие породных отвалов Восточного Донбасса на компоненты окружающей среды // *Colloquium-Journal*. – 2023. – № 22-1(181). – С. 19–21.

4. Калаева С.З., Богданов С.М., Лукин Н.О., Огер А.А. Породные отвалы угольных шахт России // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. – 2016. – № 1. – С. 3–23.

5. Лобов М.И., Гоженко А.И. Особенности формирования экологических каркасов промышленных городов // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. – 2018. – № 4-1(132). – С. 68–72.

6. Мохов А.В. Микроэлементы в водах действующих шахт Восточного Донбасса // *Геология и геофизика Юга России*. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 6–15. DOI: 10.46698/VNC.2024.36.66.002.

7. Невидомская Д.Г., Савин И.С., Минкина Т.М., Шерстнев А.К. Элементный состав почв, прилегающих к породным отвалам восточного Донбасса территории РФ // *Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность»* / ред. Г.В. Кучерик, Ю.А. Омельчук. – Севастополь: СГУ, 2021. – С. 468–471.

8. Павлова Н.В., Зубов А.Р. Шахтная порода как техногенное сырье в Донбассе: потенциал и перспективы устойчивого развития // *Экологический вестник Донбасса*. – 2025. – № 3(16). – С. 46–52.

9. Сkläренко Г.Ю., Закруткин В.Е., Зубов А.Р., Зубова Л.Г., Решетняк О.С. Влияние угледобычи в Донбассе на подземные и поверхностные воды // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. – 2017. – № 3-1. – С. 100–107.

10. Сочилин А.В., Садеков Д.Р., Котов В.С. Биоиндикационная оценка влияния продуктов горения породных отвалов угольных шахт на экологическую ситуацию // *Вестник гигиены и эпидемиологии*. – 2023. – Т. 27. – № 1. – С. 51–53.

11. Шехурдин Г.Р., Сkläренко Г.Ю. Особенности формирования и развития городского теплового поля Ростова-на-Дону в период с 1984 по 2023 год (по данным дистанционного зондирования Земли) // *Успехи современного естествознания*. – 2024. – № 3. – С. 87–93.

12. Шяймартьянов Т.Э. К проблеме рекультивации хранилищ хвостов обогащения углей Донбасса // *Вектор ГеоНаук*. – 2018. – Т. 1. № 3. – С. 53–64.

13. Duo L., Wang J., Zhong Y., Jiang Ch., Chen Y., Guo X. Ecological environment quality assessment of coal mining cities based on GEE platform: A case study of Shuozhou, China // *International Journal of Coal Science and Technology*. – 2024. – Vol. 11. – DOI 10.1007/s40789-024-00723-8.

14. Ghosh P. Mining tourism potential assessment of Raniganj coalfield, India // *An International Journal of Akdeniz University Tourism Faculty*. – 2021. – Vol. 9(2). – pp. 341–367.

15. Krzyszowska-Waitkus A. Sustainable reclamation practices for a large surface coal mine in shortgrass prairie, semiarid environment (Wyoming, USA): case study // *International Journal of Coal Science and Technology*. – 2022. – Vol. 9. DOI: 10.1007/s40789-022-00502-3.

16. Kucbel M., Raclavska H., Slamova K., Safarr M., Svedova B., Juchelkova D., Ruzickova J. Environmental impact assessment of the coal yard and ambient pollution // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2025. – Vol. 32. – pp. 27590–27607. DOI: 10.1007/s11356-024-32490-z.

17. Nafees A., Fu X., Ashraf U., Chen J., Thanh H., Anees A., Riaz Sh., Fida M., Hussain M. A., Hussain S., Hussain W., Ahmed A. Remote sensing for surface coal mining and reclamation monitoring in the Central Salt Range, Punjab, Pakistan // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14. – Art. No. 9835. DOI: 10.3390/su14169835.

18. Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2007. – I.4. – pp. 439–473.

19. Rohaendi N., Salajar R., Prata D.A., Oktariadi O. Mining-based tourism in Sawahlunto National Geopark // *International Journal of Applied Sciences in Tourism and Events*. – 2022. – Vol. 6. – pp. 151–163. DOI: 10.31940/ijaste.v6i2.

20. Rouhani A., Skousen J., Tack F.M.G. An Overview of Soil pollution and remediation strategies in Coal Mining Regions // *Minerals*. – 2023. – Vol. 13. – Art. No. 1064. DOI: 10.3390/min13081064.

21. Szewczyk-Swiatek A. Sustainable transformation of post-mining areas: discreet alliance of stakeholders in influencing the public perception of heavy industry in Germany and Poland // *Sustainability*. – 2025. – Vol. 17(19). – Art. No. 8567. DOI: 10.3390/su17198567.

References

1. Artemov I.A. Mineralogical and petrographic zoning of rocks of burning waste heaps of the Eastern Donbass. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. – Vol. 15. No. 2. pp. 155–165. DOI: 10.46698/VNC.2025.14.75.001. (In Russ.)
2. Buraeva E.A., Shishlov I.V., Kuznetsova K.A., Bobylev V.A., Kachusov D.A., Shapovalov E.S., Ratushny V.I., Ermolaeva N.V. Radiation environment in areas of the Rostov region with different anthropogenic load. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI"*. 2026. Vol. 15. No. 1. pp. 91–104. DOI: 10.26583/vestnik.2026.1.8. (In Russ.)
3. Voskovykh K.A. Impact of spoil heaps of Eastern Donbass on environmental components. *Colloquium-Journal*. 2023. No. 22-1(181). pp. 19–21. (In Russ.)
4. Kalaeva S.Z., Bogdanov S.M., Lukin N.O., Oger A.A. Waste dumps of russian coal mines. *Izvestiya Tula State University. Sciences of Earth*. 2016. No. 1. pp. 3–23. (In Russ.)
5. Lobov M.I., Gozhenko A.I. Features of formation of ecological skeletons of industrial cities. *Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2018. No. 4-1(132). pp. 68–72. (In Russ.)
6. Mokhov A.V. Microelements in the waters of operating mines in the Eastern Donbass. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 6–15. DOI: 10.46698/VNC.2024.36.66.002. (In Russ.)
7. Nevidomskaya D.G., Savin I.S., Minkina T.M., Sherstnev A.K. Elemental composition of soils adjacent to dumps of coal waste of the Eastern Donbass territory of the Russian Federation. In: *Environmental, Industrial and Energy Security – 2021*. / Eds. G.V. Kucherik, Yu.A. Omelchuk. Sevastopol. SevSU, 2021. pp. 468–471. (In Russ.)
8. Pavlova N.V., Zubov A.R. Mine rock as a man-made raw material in the Donbass: potential and prospects for sustainable development. *Ecological Bulletin of Donbass*. 2025. No. 3(16). pp. 46–52. (In Russ.)
9. Sklyarenko G.Yu., Zakrutkin V.E., Zubov A.R., Zubova L.G., Reshetnyak O.S. Influence of the coal mining in the Donbass on underground and surface water. *Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii region. Natural Science*. 2017. No. 3-1. pp. 100–107. (In Russ.)
10. Sochilin A.V., Sadekov D.R., Kotov V.S. Bioindication assessment of the impact of the combustion products of coal mines dumps on the ecological situation. *Vestnik of Hygiene and Epidemiology*. 2023. Vol. 27(1). pp. 51–53. (In Russ.)
11. Shekhurdin G.R., Sklyarenko G.Yu. Peculiarities of formation and development of the urban thermal field of Rostov-on-Don in the period from 1984 to 2023 (according to remote sensing data). *Advances in Current Natural Sciences*. 2024. No. 3. pp. 87–93. (In Russ.)
12. Sheymartdyanov T.E. To the problem of reclamation of the storage of tailings of coal enrichment of Donbass. *Vector of Geosciences*. 2018. Vol. 1. No. 3. pp. 53–64. (In Russ.)
13. Duo L., Wang J., Zhong Y., Jiang Ch., Chen Y., Guo X. Ecological environment quality assessment of coal mining cities based on GEE platform: A case study of Shuozhou, China. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2024. Vol. 11. DOI 10.1007/s40789-024-00723-8.
14. Ghosh P. Mining tourism potential assessment of Raniganj coalfield, India. *An International Journal of Akdeniz University Tourism Faculty*. 2021. Vol. 9(2). pp. 341–367.
15. Krzyszowska-Waitkus A. Sustainable reclamation practices for a large surface coal mine in shortgrass prairie, semiarid environment (Wyoming, USA): case study. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2022. Vol. 9. DOI: 10.1007/s40789-022-00502-3.
16. Kucbel M., Raclavska H., Slamova K., Safarr M., Svedova B., Juchelkova D., Ruzickova J. Environmental impact assessment of the coal yard and ambient pollution. *Environmental Science and Pollution Research*. 2025. Vol. 32. pp. 27590–27607. DOI: 10.1007/s11356-024-32490-z.

17. Nafees A., Fu X., Ashraf U., Chen J., Thanh H., Anees A., Riaz Sh., Fida M., Hussain M. A., Hussain S., Hussain W., Ahmed A. Remote sensing for surface coal mining and reclamation monitoring in the Central Salt Range, Punjab, Pakistan. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Art. No. 9835. DOI: 10.3390/su14169835.
18. Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2007. I.4. pp. 439–473.
19. Rohaendi N., Salajar R., Prata D.A., Oktariadi O. Mining-based tourism in Sawahlunto National Geopark. *International Journal of Applied Sciences in Tourism and Events*. 2022. Vol. 6. pp. 151–163. DOI: 10.31940/ijaste.v6i2.
20. Rouhani A., Skousen J., Tack F.M.G. An Overview of Soil pollution and remediation strategies in Coal Mining Regions. *Minerals*. 2023. Vol. 13. Art. No. 1064. DOI: 10.3390/min13081064.
21. Szewczyk-Swiatek A. Sustainable transformation of post-mining areas: discreet alliance of stakeholders in influencing the public perception of heavy industry in Germany and Poland. *Sustainability*. 2025. Vol. 17(19). Art. No. 8567. DOI: 10.3390/su17198567.

УДК 551.332.56: 556.166.4

DOI: 10.46698/VNC.2026.92.80.001

Оригинальная статья

Прорывы озёр в 2025 году: причины и последствия

М.Ю. Беккиев[✉], М.Д. Докукин[✉], Р.Х. Калов[✉]

Высокогорный геофизический институт,
Россия, 360001, г. Нальчик, пр. Ленина, 2,
e-mail: inrush@bk.ru

Статья поступила: 17.04.2026, доработана: 15.06.2026, принята к публикации: 18.06.2026

Резюме: Актуальность работы. В результате деградации ледников нередко образуются озёра, которые вследствие разрушения плотин прорываются, вызывая катастрофические паводки и селевые потоки. Для оценки опасности прорыва существующих и образующихся озёр очень важна информация об условиях и механизмах фактических прорывов озёр, чтобы идентифицировать новые озёра и определить признаки и степень их прорывоопасности. В 2025 г. произошли прорывы озёр на Эльбрусе у ледника Малый Азау в Кабардино-Балкарии (Центральный Кавказ), в ущелье Такыр-Тор (хребет Терской-Алатау, Кыргызстан) и в долине Матайян (Тайвань), каждый из которых имел характерные особенности, учёт которых важен для распознавания участков будущих прорывных катастроф. **Цель исследования** – провести анализ условий, причин и механизмов произошедших прорывов озёр. **Материалы и методы.** Работа основана на результатах анализа разновременных космоснимков и материалах съёмки с БПЛА (ортофотоплан и цифровая модель рельефа). **Результаты.** Анализ разновременных космоснимков показал, что озеро Такыр-Тор в Кыргызстане появилось в тыловой котловине каменного глетчера в 2025 году, а ранее в течение более 10 лет отсутствовало. После двух прорывов 27 июня и 1 июля по подземному каналу в теле каменного глетчера озеро снова исчезло. Озеро в долине р. Матайян на Тайване возникло 19 июля 2025 г. в результате схода оползня и блокирования стока реки. Прорыв озера произошёл 23 сентября в результате волны на озере, образовавшейся от входа в озеро селевого потока, вызванного аномальными осадками тайфуна Рагаса. Прорыв каскада озёр на Эльбрусе произошёл из-за волны на поверхности воды верхнего озера от паводка с ледника Малый Азау и последовательных размывов моренных плотин нижележащих озёр. **Выводы.** Примеры прорывов озёр в 2025 г. показали, что аномальный приток воды с ледника, блокировка подземного канала стока в теле каменного глетчера, сход селя в озеро из-за аномальных осадков в бассейне реки, впадающей в озеро, могут приводить к прорывам озёр. Своевременно выявленные в результате мониторинга высокогорной зоны, дешифрирования космоснимков и анализа метеоусловий потенциальные угрозы прорыва озёр позволяют принять меры, чтобы избежать гибели людей.

Ключевые слова: космоснимок, ледниковое озеро, подземный канал стока, каменный глетчер, завальная плотина, прорывной паводок.

Благодарности: Публикация подготовлена в рамках научно-исследовательской темы 2.12 Плана НИТР Росгидромета на 2025 г., № госрегистрации 125041005097-4.

Для цитирования: Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х. Прорывы озёр в 2025 году: причины и последствия. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 232–243. DOI: 10.46698/VNC.2026.92.80.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.92.80.001

Original paper

Lake outbursts in 2025: causes and consequences

M.Y. Bekkiev^{ORCID}, M.D. Dokukin^{ORCID}, R.H. Kalov^{ORCID}

High-Mountain Geophysical Institute, 2 Lenin Ave.,
Nalchik 360001, Russian Federation,
e-mail: inrush@bk.ru

Received: 17.04.2026, revised: 15.06.2026, accepted: 18.06.2026

Abstract: Relevance. As a result of glacier degradation, lakes are formed, the outbursts of which cause catastrophic floods. To assess the danger of existing and emerging lakes, information about the conditions and mechanisms of actual lake outburst is very important. **Aim.** The Aim is to analyze the conditions, causes, and mechanisms of lake outbursts in 2025. **Materials and methods.** The work is based on the results of an analysis of multi-time satellite images and UAV survey materials. **Results.** An analysis of satellite images showed that Lake Takyr-Tor appeared in Kyrgyzstan in 2025 and had been absent for more than 10 years previously. Lake outbursts through an underground channel in the rock glacier occurred on June 27 and July 1. The lake in the Mataiyang River Valley in Taiwan was formed on July 19, 2025 as a result of a landslide and blocking the flow of the river. The lake outburst on September 23 was caused by a wave generated by a debris flow entering the lake, which resulted from the abnormal precipitation brought by Typhoon Ragasa. The outburst of the cascade of lakes on Elbrus occurred due to a wave on the upper lake from a flood from the Maly Azau glacier. **Conclusions.** Examples of lake outbursts in 2025 showed that an abnormal inflow of water from a glacier, blocking of an underground drainage channel in the rock glacier, and debris flows into a lake due to abnormal precipitation in the basin of a river flowing into the lake can lead to lake outbursts. The potential threats of lake outburst, which were identified in a timely manner as a result of monitoring the high-altitude zone, decoding satellite images and analyzing weather conditions, make it possible to take measures to avoid loss of life.

Keywords: satellite image, glacial lake, underground drainage channel, rock glacier, dam blockage, lake outburst flood.

Acknowledgements: The publication was prepared as part of the research topic 2.12 of the Russian Hydrometeorological Research Plan for 2025, No. 125041005097-4.

For citation: Bekkiev M.Y., Dokukin M.D., Kalov R.H. Lake outbursts in 2025: causes and consequences. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 232–243. DOI: 10.46698/VNC.2026.92.80.001

Введение

В результате изменения климата и деградации горных ледников появляется большое количество ледниковых озёр, которые со временем прорываются, вызывая по долинам рек катастрофические паводки. По данным [Taylor et al., 2023] 15 млн человек во всем мире проживают в условиях потенциального воздействия прорывных паводков, более половины из них – в Индии, Пакистане, Перу и Китае. Вследствие высокой опасности прорывных паводков ледниковые озёра инвентаризируются и анализируется изменение их количества и площади. В высокогорной Азии зафиксировано в 2018 г. 28 953 ледниковых озера общей площадью около 2000 км² [Wang et al., 2020]. Одним из самых катастрофических был паводок от прорыва озера Чорабари в Индии в 2013 г. [Allen et al., 2016], в результате которого погибло более 6000

человек. Озеро существовало более 100 лет. В 2 км ниже него располагался посёлок паломников Кедарнатх, и никто не ожидал прорыва.

Возникают также ситуации, когда исследованиями выявляется высокая опасность прорыва, но далеко не всегда удаётся принять необходимые меры для снижения риска чрезвычайной ситуации. Длительное время изучалось озеро Башкара в долине р. Адылсу (бассейн р. Баксан, Центральный Кавказ) и отмечалось, что опасность прорыва высока, но прорыв 01.09.2017 был неожиданным, что привело к человеческим жертвам. Подобный пример был с озером Лхонак Южное в Гималаях, в индийском штате Сикким, в 2023 г. [Zhang et al., 2025], когда в результате прорыва погибло 178 человек и были разрушены три гидроэлектростанции. До этого, после исследований по оценке опасности прорыва озера [Sattar et al., 2021], было рекомендовано создание системы раннего предупреждения, но на практике оно реализовано не было. В результате исследований озёр в верховьях р. Малка в 2005 г. были выявлены явная угроза прорыва озера Бирджалы и возможный механизм этого процесса, а также сделано предупреждение об этом [Черноморец и др., 2006], но система оповещения создана не была. Так как прорыв произошёл рано утром, человеческих жертв не было.

Для оценки опасности прорывов озёр, кроме параметров озёр, очень важно определить тип озера и его котловины, что даёт возможность оценить механизм прорыва. Такой подробный анализ проведён для озёр района Кордильера-Бланка в Перу [Iturrizaga, 2014], для озёр в Гималаях [Mohanty, Gantayat, 2026], в Кыргызстане [Ерохин, Загинаев, 2020], в России [Хромова и др., 2021].

Практически ежегодно происходят прорывы ледниковых озёр в разных горных районах мира. В настоящей статье представлена информация о прорывах озёр в 2025 г.: на склоне г. Эльбрус у ледника Малый Азау 6 августа, в долине р. Такыр-Тор в Кыргызстане 27 июня и 1 июля, в долине р. Матайян на Тайване 23 сентября.

Материалы и методы исследований

В работе использовались космоснимки спутника Sentinel-2 разрешением 10 м (browser.dataspace.copernicus.eu) до и после дат прорывов озёр в Кыргызстане, на Тайване и на Эльбрусе, космоснимок Google Earth от 28.08.2022, ортофотоплан и цифровая модель местности от 07.08.2025 (материалы аэрофотосъёмки ФГБУ «ВГИ» с использованием квадрокоптера Геоскан 401 Геодезия) участка озёр у ледника Малый Азау на Эльбрусе, космоснимок Google Earth от 24.11.2025 участка озера на Тайване.

Для того чтобы оценить изменения озёр и их котловин, а также участков речных долин после прорывов озёр, попарно просматривались космоснимки в программе ArcMap с использованием инструмента «Зашторить слой» (интерактивное отображение последнего по времени космоснимка, расположенного ниже предыдущего), создавались векторные слои контуров озёр и зон отложений паводков, определялись площади озёр. На участке у ледника Малый Азау строились горизонталы рельефа через 0,5 м для определения изменений уровня воды в озёрах.

Обработка материалов аэрофотосъёмки участка у ледника Малый Азау проводилась в программе Agisoft Metashape Professional.

Результаты исследований и их обсуждение

Прорывы озёр у ледника Малый Азау на Эльбрусе 06.08.2025

В июле 2025 г. произошли катастрофические сели в долине р. Герхожансу бассейна р. Баксан, а 6 августа наблюдался сход селя по левому притоку р. Азау выше р. Малая Азау вследствие прорыва озёр у ледника Малый Азау. Факт прорыва установлен по многочисленным видеороликам в сети Интернет. На следующий день специалисты ФГБУ «ВГИ» поднялись с квадрокоптером и сделали аэрофотосъёмку участка, прилегающего к озёрам (рис. 1b).

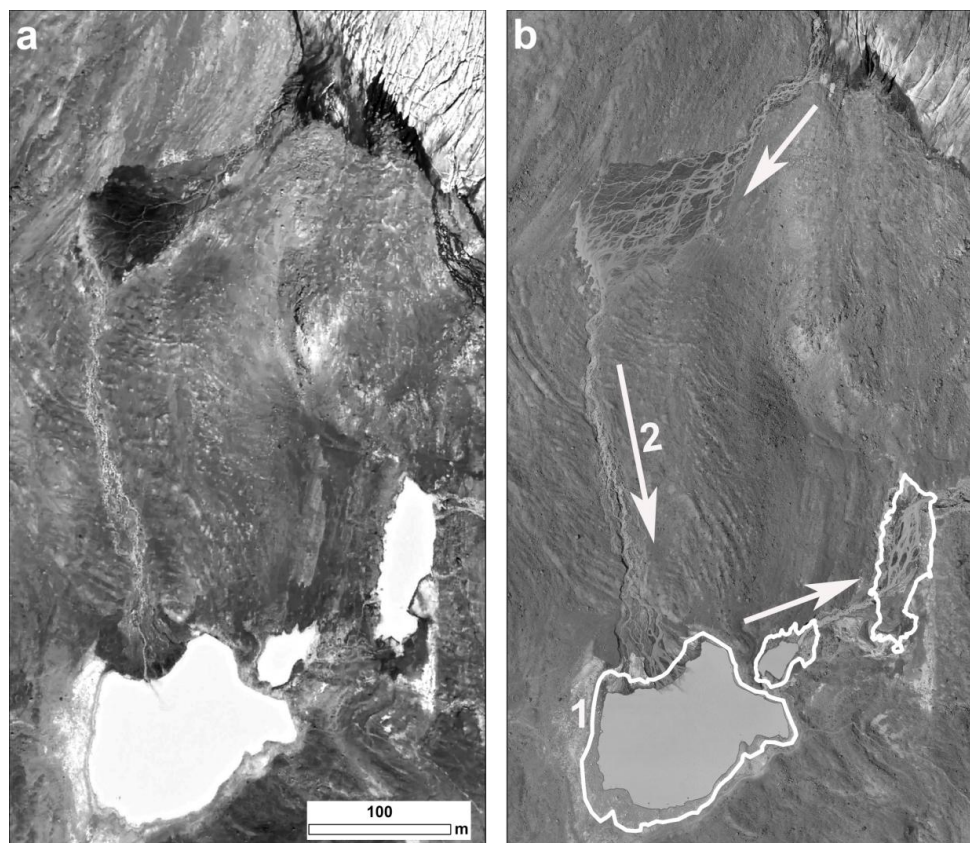


Рис. 1. Участок прорыва озёр у ледника Малый Азау на склоне Эльбруса 06.08.2025 на космоснимке от 28.08.2022 (Google Earth) (a) и на ортофотоплане от 07.08.2025 (b).

1 – контуры озёр до прорыва, 2 – направление притока воды в озёра и прорывного паводка /

Fig. 1. The lake outburst site near the Maly Azau glacier on the slope of Elbrus on August 6, 2025, as seen in a satellite image from August 28, 2022 (Google Earth) (a) and an orthophotomap from August 7, 2025 (b). 1 – lake contours before the outburst, 2 – direction of water inflow into the lakes and the outburst flood

Для оценки состояния озёр до прорыва анализировались космоснимки Sentinel-2 и был сделан вывод, что озёра в 2025 и 2022 гг. были одинаковыми, и поэтому для оценки изменений за основу был взят детальный космоснимок 2022 г. (рис. 1a).

До прорыва существовало 3 озера. Их площадь составляла 12,5 тыс. м² (верхнее), 1,1 тыс. м² (среднее) и 3,2 тыс. м² (нижнее). После прорыва осталось два озера: 9,2 тыс. м² (верхнее) и 0,45 тыс. м² (среднее, теперь – нижнее). По пути к озеру за счёт донной эрозии прорывной паводок стал селом и вошёл в озеро в виде волны.

В результате прорыва глубина верхнего и среднего озёр уменьшилась на 1 м (данные анализа горизонталей через 0,5 м). Исходя из изменений площади и глубины, уменьшение объёма составило 10,8 тыс. м³ и 0,8 тыс. м³. Глубина нижнего озера до прорыва была 3 м, а объём – около 7,0 тыс. м³. Итого общий объём сброшенной воды с трёх озёр составил 18,6 тыс. м³. Котловина нижнего озера частично заполнилась отложениями селя, который сформировался в момент прорыва. Ниже озёр происходил размыв русла (донная эрозия) и прошёл селевой поток, видео которого было в интернете. По данным космоснимков Sentinel-2 селевой материал отложился на конусе выноса, как и в 2011 г. Негативных последствий на дне долины р. Азау не отмечено. До прорыва озёр осадков не было зафиксировано, следовательно, причиной прорыва был сброс воды с ледника без участия атмосферных осадков (следы потока с ледника видны на рис. 1b).

В прошлом были прорывы озера у ледника Малый Азау в 1978 и 2011 гг. [Докукин, Хаткутов, 2016]. До прорыва в 2011 г. площадь озера составляла 25,5 тыс. м² и объём сброшенной воды при прорыве достигал 17,0 тыс. м³ (почти как в 2025 г.). Но причина прорыва была другая – поверхностный размыв ледяной гряды, образующей плотину, как при прорыве озера на севере Эльбруса в 2006 г. [Черноморец и др., 2006]. Разрушительных последствий от сходов селей после прорывов 2011 и 2025 гг. не было вследствие малых расходов прорывных паводков.

В будущем прорывы оставшегося озера у ледника Малый Азау также возможны, так как при деградации ледника возможно накопление талых вод под ледником и формирование водных импульсов и селевых потоков, которые в случае схода в озеро снова приведут к его прорыву. Примеры формирования таких водных импульсов отмечены на севере Эльбруса в 2010 и 2013 гг.

Прорывы озера Такыр-Тор в Кыргызстане 27 июня и 1 июля 2025 г.

27 и 28 июня 2025 г. в сети Интернет появились сообщения о прорыве озера Такыр-Тор в Ысык-Атинском районе Чуйской области, в результате которого был разрушен мост между селами Алмалуу и Кебек-Бий (Горная Серафимовка) («Прорыв озера Такыр-Тор. Эвакуированные временно размещены в других селах», 2025 // <https://report.kg/proisshestiya/40821-proryv-ozera-takyr-tor-jevakuirovannye-vremenno-razmescheny-v-drugih-selah>, дата обращения: 23.03.2026), расположенный на расстоянии около 15 км от озера. Было эвакуировано 950 человек, жилые дома и объекты инфраструктуры не пострадали.

Анализ космоснимков Sentinel-2 показал, что озеро перед прорывом имело площадь 52,5 тыс. м², длину – 470 м (рис. 2b).

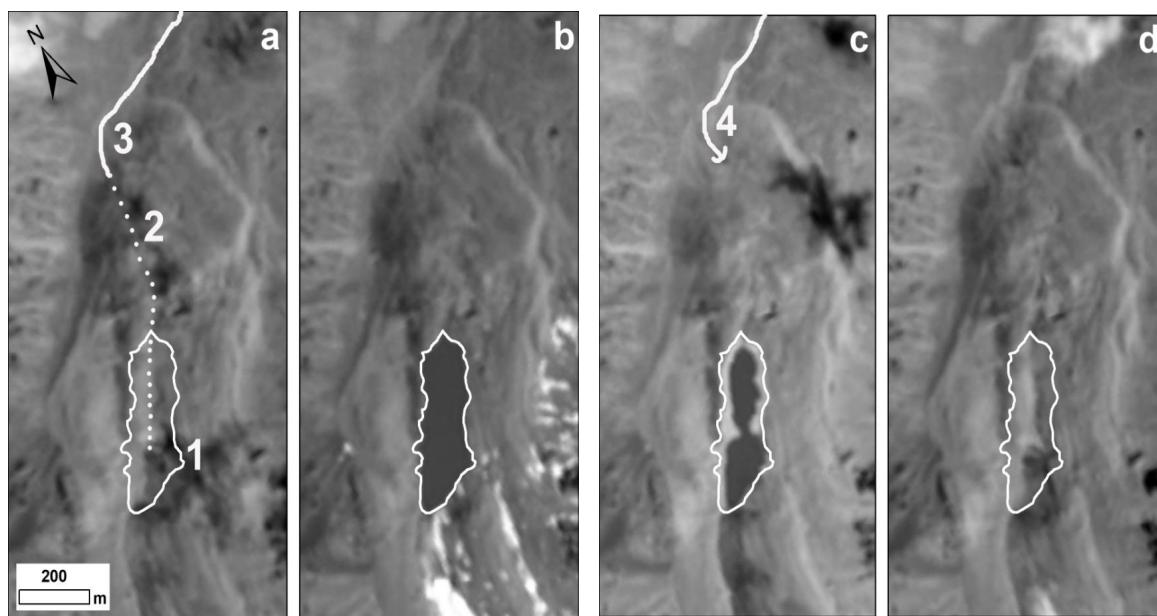


Рис. 2. Участок озера Такыр-Тор в Кыргызстане до и после прорывов 27 июня и 1 июля 2025 г. на космоснимках Sentinel-2. (a) 20.08.2024, 1 – контур озера при максимальном заполнении котловины, 2 – подземный канал стока талых вод ледника, 3 – русло с поверхностным водотоком; (b) 21.06.2025, (c) 03.07.2025, 4 – участок выхода прорывного паводка на поверхность; (d) 20.08.2025 /

Fig. 2. A section of Lake Takyr-Tor in Kyrgyzstan before and after the outbursts on June 27 and July 1, 2025 on Sentinel-2 satellite images. (a) 08/20/2024, 1 – contour of the lake at maximum filling of the basin, 2 – underground channel of glacier meltwater runoff, 3 – channel with surface watercourse; (b) 06/21/2025, (c) 07/03/2025, 4 – the area of the outburst flood to the surface; (d) 08/20/2025

По данным («Прорыв озера Такыр-Тор. Эвакуированные временно размещены в других селах», 2025 // <https://report.kg/proisshествija/40821-proryv-ozera-takyr-tor-jevakuirovannye-vremenno-razmescheny-v-drugih-selah>, дата обращения: 23.03.2026), объём озера составлял 450 тыс. м³. Озеро было расположено в котловине массива каменного глетчера между широкими боковыми валами. Поверхностный сток с озера отсутствовал. Верхний край озера соприкасался с ледником, частично покрывая его. Нижний край ограничивался массивом каменного глетчера и был на расстоянии 400 м от его фронтального уступа, в верхней части которого сток с озера выходил на поверхность. На рисунке 3 показан фронтальный уступ каменного глетчера с местом выхода потока на поверхность после прорыва озера (на рис. 2с отмечен № 4).



Рис. 3. Участок фронтального уступа каменного глетчера после прорыва озера Такыр-Тор. Фото пресс-службы Кабинета Министров Кыргызской Республики, 27.06.2025 («Прорыв озера Такыр-Тор. Эвакуированные временно размещены в других селах», 2025 // <https://report.kg/proisshествija/40821-proryv-ozera-takyr-tor-jevakuirovannye-vremenno-razmescheny-v-drugih-selah>, дата обращения: 23.03.2026) /

Fig. 3. The front ledge of the rock glacier after the outburst of Lake Takyr-Tor. Photo by the press service of the Cabinet of Ministers of the Kyrgyz Republic on 27.06.2025 (Lake Takyr-Tor has burst. Evacuees have been temporarily housed in other villages. 2025. // <https://report.kg/proisshествija/40821-proryv-ozera-takyr-tor-jevakuirovannye-vremenno-razmescheny-v-drugih-selah>. (accessed 03/23/2026)

Анализ космоснимков 2025 г. показал, что котловина озера Такыр-Тор заполнялась постепенно, начиная с мая. В предыдущие годы в период 2015–2024 гг. котловина оставалась пустой (см. рис. 2а), за исключением небольшого озера площадью 3–4 тыс. м². Это свидетельствует о том, что подземный канал стока талых вод с ледника работал стабильно. И лишь весной 2025 г. произошла его блокировка, из-за чего и наполнилась котловина водой. Прорыв образовавшегося озера произошёл в результате быстрой разблокировки подземного канала стока. Так как космоснимок от 28.06.2025 показал, что после прорыва в котловине оставалась значительная часть воды, можно сделать вывод о том, что объём сброшенной воды включал значительный объём воды, накопившейся внутри каменного глетчера. Уровень воды в озере к 1 июля снова достиг первоначального состояния, и произошёл повторный прорыв, к которому соответствующие службы были готовы, и люди снова были эвакуированы. В результате второго прорыва по долине р. Такыр-Тор снова прошли паводок и се-

левой поток, достигший моста на дороге, соединяющей сёла Алмалуу и Кебек-Бий.

После второго прорыва уровень воды в озере Такыр-Тор уменьшался постепенно, и озеро полностью исчезло только к 20 августа (см. рис. 2d).

Ранее в результате исследований прорывов озёр в каменных глетчерах были сделаны выводы:

1) большую часть времени озёрные котловины оставались пустыми, и их заполнение происходило в начале тёплого сезона в год прорыва, что позволяет выявить опасность прорыва озера заблаговременно;

2) котловина озера может опорожняться не сразу на полную глубину;

3) опорожнение озёрной котловины может происходить без прорывного паводка;

4) котловины озёр могут заполняться и прорываться несколько раз с промежутком в несколько лет;

5) в будущем озёра могут появляться на участках каменных глетчеров, где они раньше не были зафиксированы, что обуславливает необходимость мониторинга каменных глетчеров и оценки параметров рельефа котловин как вместилищ озёр [Докукин и др., 2020].

Исследование прорывов озера Такыр-Тор позволило уточнить вывод о периодичности прорывов озёр в каменных глетчерах: прорыв может повториться через несколько дней.

Вследствие того, что озёра в котловинах каменных глетчеров длительное время отсутствуют, большей частью они не являются объектами мониторинга, и поэтому прорывы таких озёр становятся неожиданными и оборачиваются катастрофами. Есть несколько таких примеров: разрушение кишлака Дашт на Памире в Таджикистане в 2002 г., сход селя на г. Алматы в 2015 г. от прорыва озера в верховьях р. Каргалы в Казахстане, разрушение кишлака Пашгор в Панджшерском ущелье в Афганистане в 2018 г., и др. [Докукин и др., 2020]. В этом отношении важно отметить, что озеро Такыр-Тор было объектом мониторинга. Известны его прорывы в 1991 и 2009 гг. [Zaginaev et al., 2024]. Появление озера в 2025 г. было обнаружено на этапе его роста, и предупреждение об угрозе прорыва было сделано за неделю до события («Гидрогеологи предупреждали МЧС о прорыве озера Такыр-Тор за неделю до ЧС», 2025 // <https://report.kg/obschestvo/41650-gidrogeologi-preduprezhdali-mchs-o-proryve-ozera-takyr-tor-za-nedelju-do-chs.html?ysclid=mn3gp3ellv942726686>, дата обращения: 24.03.2026), что позволило принять необходимые меры по снижению риска негативных последствий.

Прорыв озера в долине р. Матайян на Тайване 23.09.2025 г.

23 сентября 2025 г. произошёл прорыв озера в долине р. Матайян в уезде Хуалянь на Тайване, что имело катастрофические последствия. По сообщению (Super Typhoon Ragasa death toll climbs to 19. 2025. // <https://www.taipeitimes.com/News/taiwan/archives/2025/10/09/2003845172> (дата обращения: 23.03.2026)) погибло 19 жителей, 7 человек пропали без вести. Это было следствием прохождения тайфуна «Рэгаса». Во время ливней быстро наполнилась котловина озера, которое образовалось в результате схода оползней (обвалов) с левого склона долины р. Матайян 19 июля из-за ливней тайфуна «Вифа» (рис. 4ab).

Зона отрыва оползней (обвалов) шириной 2,4 км охватывала водораздел левого притока р. Матайян и соседней реки, площадь зоны поражения – 7,6 км². Во время движения обвально-оползневые массы поднимались по левому склону долины до высоты около 450 м, а затем закрыли плотиной высотой 120 м основное русло реки. Ниже отложений обломочных масс отмечается зона воздействия воздушной волны в виде полос поваленного леса протяжённостью до 300 м и шириной до 50 м (космоснимок Google Earth, 24.11.2025).

Постепенно за период 19 июля – 23 сентября образовалось озеро площадью около $0,9 \text{ км}^2$ и длиной $2,3 \text{ км}$ (рис. 4с). Объём воды, сброшенной из озера 23 сентября, достигал, по данным правительства, 60 млн м^3 (Arranz A., Aluckal A.J., Huang H., Kawoosa V.M. Typhoon Ragasa. How heavy rainfall led to a lake bursting in Taiwan. 2025. // <https://www.reuters.com/graphics/ASIA-EATHER/TAIWAN/znvngwlmvl/> (дата обращения: 02.03.2026)). По материалам анализа космоснимков (рис. 4д), в озеро вследствие выпадения аномальных осадков сходили склоновые селевые потоки (особенно с размывом обвальнo-оползневых отложений), которые ускорили прорыв обвальнo-оползневой плотины, начавшийся после поднятия уровня воды в озере до высоты плотины.

Значительная площадь посёлка Гуанфу была занесена отложениями прорывного паводка (рис. 5b) – $10,2 \text{ км}^2$.

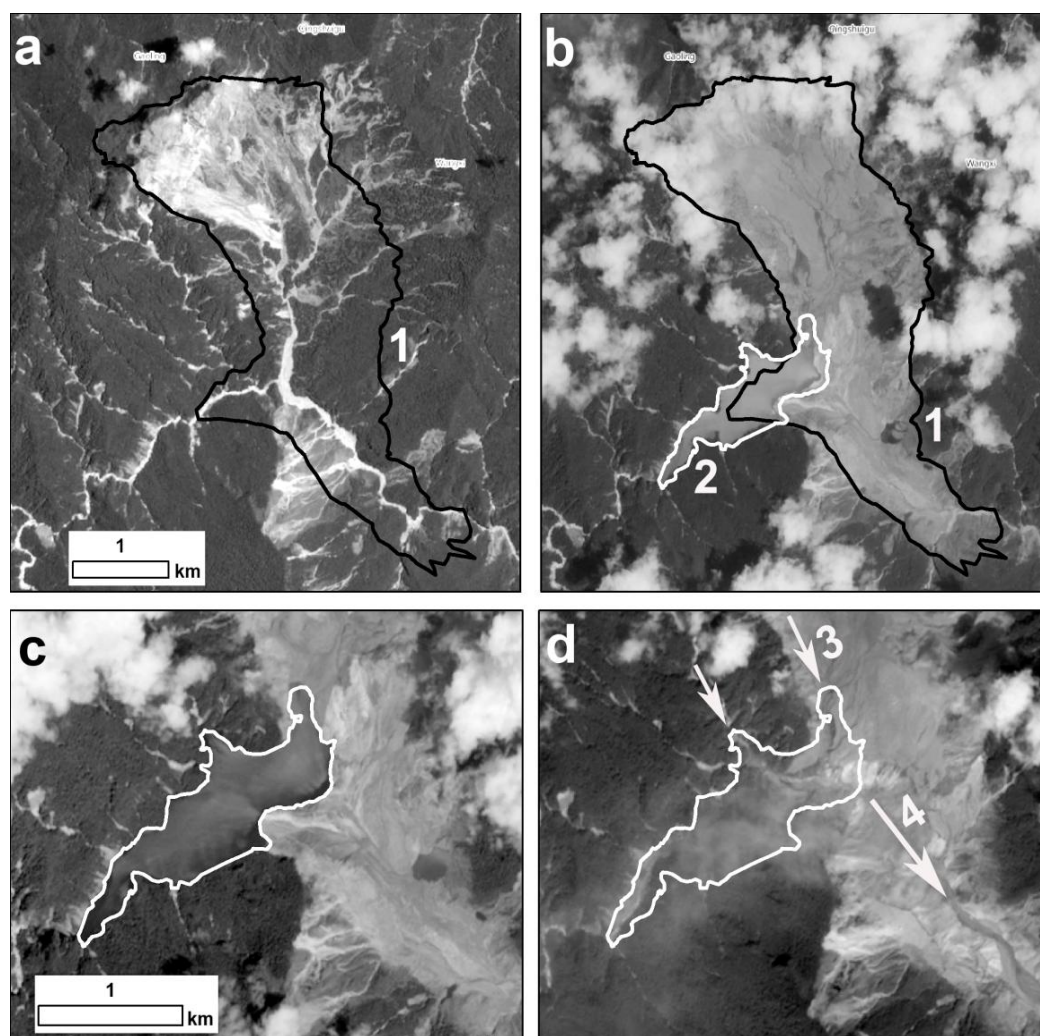


Рис. 4. Участок схода оползней (обвалов), формирования и прорыва озера в долине р. Матайян (Тайвань) на космоснимках Sentinel-2: (a) 15.06.2025, (b) 17.08.2025, (c) 11.09.2025, (d) 01.10.2025.

1 – зона поражения обвальнo-оползневым процессом 19.07.2025, 2 – контур озера 11.09.2025,

3 – русла селевых потоков, сошедших в озеро, 4 – направление прорыва озера /

Fig. 4. The area of landslides, formation and outburst of a lake in the Mataiyan River valley (Taiwan) on Sentinel-2 satellite images: (a) 06/15/2025, (b) 08/17/2025, (c) 09/11/2025, (d) 10/01/2025.

1 – area affected by the landslide process on July 19, 2025, 2 – lake outline 09/11/2025, 3 – the channels of debris flows that descended into the lake, 4 – direction of the lake outburst

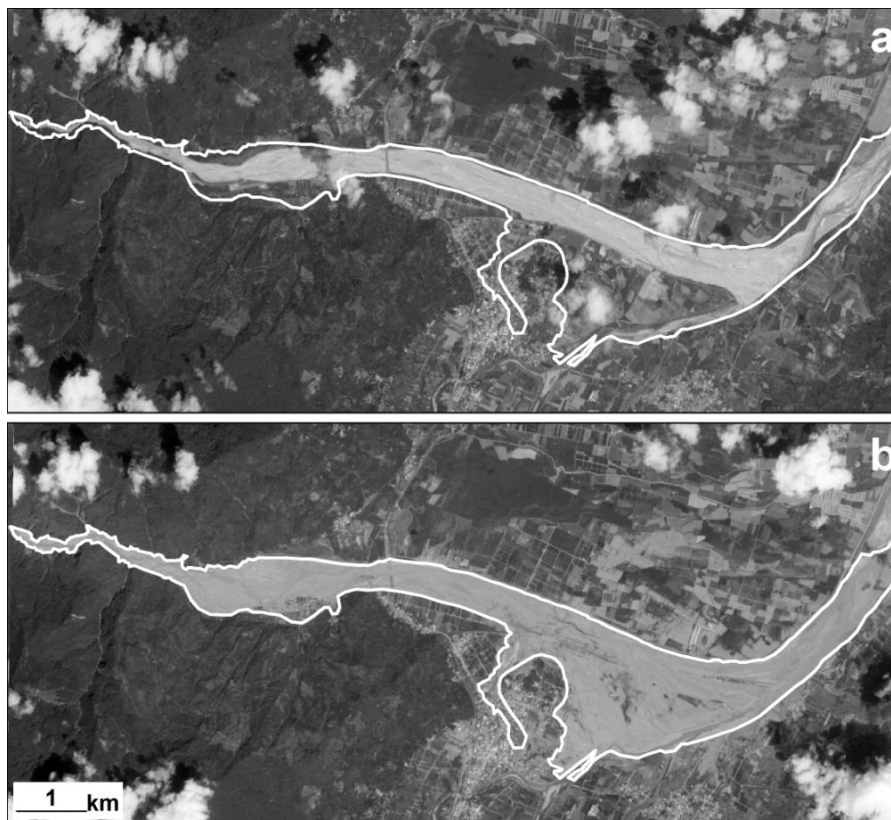


Рис. 5. Зона отложений прорывного паводка на территории пос. Гуанфу на космоснимках: (a) 11.09.2025, (b) 01.10.2025 /

Fig. 5. The zone of outburst flood deposits in the Guangfu settlement area in satellite images: (a) 09/11/2025, (b) 10/01/2025

За два дня до прорыва озера было отдано распоряжение об эвакуации жителей, но вследствие того, что не все люди были эвакуированы, погибло 19 жителей (Super Typhoon Ragasa death toll climbs to 19. 2025. // <https://www.taipeitimes.com/News/taiwan/archives/2025/10/09/2003845172> (дата обращения: 23.03.2026)). Это показало, что мероприятия по снижению рисков негативных последствий прорывов озёр не всегда достигают нужного результата.

Подобный случай оползня и прорыва озера произошёл в 1985–1986 гг. в Папуа — Новой Гвинее [King et al., 1989] в долине р. Байраман, когда после землетрясения 11 мая 1985 г. сошёл оползень и образовал на реке плотину высотой около 200 м и длиной около 3 км. 17 сентября 1985 г. было принято решение об эвакуации жителей деревни Байраман, находящейся в 39 км от формирующегося озера. Озеро к августу 1986 г. достигло объёма 50 млн м³ и до начала перелива воды через плотину принудительно были эвакуированы остававшиеся в деревне жители. Всё это время проводился мониторинг. Прорыв озера произошёл 12 сентября 1986 г. и деревня Байраман, где до первой эвакуации проживало 120 человек, была разрушена.

Прорывы озёр произошли через 2 месяца после схода оползня (Тайвань) и через 1 год и 4 месяца (Папуа — Новая Гвинея). Другие примеры озёр, подпруженных завальными плотинами свидетельствуют о том, что время существования таких озёр может превышать 100 лет (Сарезское озеро в Таджикистане, образовавшееся в 1911 г. [Лехатинов, 2020]) и даже тысячи лет (озеро Шева в Афганистане [Shroder, Weihs, 2010]). При этом не снимается вопрос о мониторинге таких озёр и их плотин с целью предупреждения о возможном прорыве.

Выводы

Анализ космоснимков и материалов аэрофотосъёмки участков прорывов озёр у ледника Малый Азау на склоне г. Эльбрус (Кабардино-Балкария, Россия), в котловине каменного глетчера в долине р. Такыр-Тор в Ысык-Атинском районе Чуйской области Кыргызской Республики, в долине р. Матайян в уезде Хуалянь на острове Тайвань в 2025 году показал, что эти озёра значительно отличались по площади (по порядку: Азау, Такыр-Тор, Матайян) – от 16,8 тыс. м², 52,5 тыс. м² до 0,9 км², и по объёму сброшенной воды – от 18,6 тыс. м³, 450 тыс. м³ до 60 млн м³.

Озёра отличались по типу плотин: невысокие моренные валы, тело каменного глетчера, обвально-оползневой массив; по типу стока воды из озера: поверхностный, по подземному каналу, отсутствие стока; по причине и механизму прорыва: наносоводный поток с ледника в озеро и образование волны с размывом моренного вала, по подземному каналу после его разблокировки, сход ливневых селевых потоков в озеро с размывом обвально-оползневой плотины.

Случай прорыва озера Такыр-Тор в Кыргызской Республике подтвердил вывод о том, что если в длительное время пустующей котловине каменного глетчера появляется озеро, то обязательно произойдёт его прорыв или даже два прорыва подряд, для минимизации ущерба от которых необходимы срочные меры. Это же относится и к озёрам, образованным обвально-оползневыми плотинами, как на Тайване (прорывы могут происходить в год образования озера), но не во всех случаях. В последние годы участились паводки вследствие изменений в подлёдных дренажных системах ледников, приводящие к прорывам ниже расположенных приледниковых озёр, что требует детальных исследований.

Литература

1. Докукин М.Д., Хаткутов А.В. Озёра у ледника Малый Азау на Эльбрусе: динамика и прорывы // Лёд и снег. – 2016. – Т. 56. № 4. – С. 472–479. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-4-472-479.
2. Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Черноморец С.С. Подземные прорывы озёр и другие проявления селей в каменных глетчерах // Труды 6-й Международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита». Т. 1. / Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020. – С. 371–387.
3. Ерохин С.А., Загинаев В.В. Типизация горных озёр Кыргызстана по степени их прорывоопасности // ГеоРиск. – 2020. Т. 14. № 3. – С. 78–86. DOI: 10.25296/1997-8669-2020-14-3-78-86.
4. Лехатинов А.М. Риск прорыва Сарезского озера: задачи изучения и прогнозирования // ГеоРиск. 2020. – Т. 14. № 2. – С. 22–31. DOI: 10.25296/1997-8669-2020-14-2-22-31.
5. Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф., Муравьев А.Я., Никитин С.А., Лаврентьев И.И. Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.) // Лёд и Снег. – 2021. – Т. 61. № 3. – С. 341–358. DOI: 10.31857/S2076673421030093.
6. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Сейнова И.Б., Крыленко И.В. Прорыв ледникового озера на северо-восточном склоне Эльбруса 11 августа 2006 г.: прогноз, событие и последствия // Материалы гляциологических исследований. – 2006. – Вып. 102. – С. 225–229.
7. Allen S.K., Rastner P., Arora M., Huggel C., Stoffel M. Lake outburst and debris flow disaster at Kedarnath, June 2013: hydrometeorological triggering and topographic predisposition // Landslides. – 2016. – Vol. 13. – pp. 1479–1491. DOI: 10.1007/s10346-015-0584-3.
8. Iturrizaga L. Glacial and glacially conditioned lake types in the Cordillera Blanca, Peru // Progress in Physical Geography. – 2014. – Vol. 38. No. 5. – pp. 602–635. DOI: 10.1177/0309133314546344.
9. King J., Loveday I., Schuster R.L. The 1985 Bairaman landslide dam and resulting debris flow, Papua New Guinea // Engineering Geology, London. – 1989. – Vol. 22. – pp. 257–270.

10. Mohanty L., Gantayat P. Comprehensive assessment of Himalayan glacial lakes concerning their distribution, dynamics, and hazard potential // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. – 2026. Vol. 17. No. 1. Art. No. 2639085. DOI: 10.1080/19475705.2026.2639085.
11. Sattar A., Goswami A., Kulkarni A.V., Emmer A., Haritashya U.K., Allen S., Frey H., Huggel C. Future Glacial Lake Outburst Flood (GLOF) hazard of the South Lhonak Lake, Sikkim Himalaya // *Geomorphology*. – 2021. – Vol. 388. No 3. – Art. No. 107783. DOI: 10.1007/s10346-024-02358-x.
12. Shroder J.F., Weihs B.J., Geomorphology of the Lake Shewa landslide dam, Badakhshan, Afghanistan using remote sensing data // *Geografiska Annaler*. – 2010. – Vol. 92 A. No 4. – pp. 469–483. DOI: 10.1111/j.1468-0459.2010.00408.x.
13. Taylor C., Robinson T.R., Dunning S., Carr J.R., Westoby M. Glacial Lake outburst floods threaten millions globally // *Nature Communications*. – 2023. – Vol. 14. – Art. No. 487. DOI: 10.1038/s41467-023-36033-x.
14. Wang X., Guo X., Yang C., Liu Q., Wei J., Zhang Y., Liu S., Zhang Y., Jiang Z., Tang Z. Glacial Lake inventory of High Mountain Asia (1990–2018) 1 derived from Landsat images // *Earth System Science Data*. – 2020. Vol. 12. No. 3. – pp. 2169–2182. DOI: 10.5194/essd-12-2169-2020.
15. Zaginaev V., Sakyev D., Nazarkulov K., Amanova M., Isaev E., Erokhin S. Monitoring the development of potential hazardous mountain Lakes using remote sensing in the Kyrgyz Republic // *International Journal of Geoinformatics*. – 2024. – Vol. 20. No. 12. – pp. 36–48. DOI: 10.52939/ijg.v20i12.3771.
16. Zhang T., Wang W., An B. A massive lateral moraine collapse triggered the 2023 South Lhonak Lake outburst flood, Sikkim Himalayas // *Landslides*. – 2025. – Vol. 22. – pp. 299–311. DOI: 10.1007/s10346-024-02358-x.

References

1. Dokukin M.D., Khatkutov A.V. Lakes near the glacier Maliy Azau on the Elbrus (Central Caucasus): dynamics and outbursts. *Ice and Snow*. 2016. Vol. 56. No. 4. pp. 472–479. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-4-472-479. (In Russ.)
2. Dokukin M.D., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Savernyuk E.A., Chernomorets S.S. Underground outbursts of lakes and other debris flow manifestations in rock glaciers. In: *Proceedings of the 6th International Conference “Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection”*. Vol. 1. Eds. S.S. Chernomorets, K.S. Viskhadzhieva. Dushanbe. Promotion LLC. 2020. pp. 371–387. (In Russ.)
3. Erokhin S.A., Zaginaev V.V. Types of mountain lakes in Kyrgyzstan by the level of their outburst hazard. *GeoRisk World*. 2020. Vol. 14. No. 3. pp. 78–86. DOI: 10.25296/1997-8669-2020-14-3-78-86. (In Russ.)
4. Lekhatinov A.M., Risk of Sarez Lake outburst: study and prediction tasks. *GeoRisk World*. 2020. Vol. 14. No. 2. pp. 22–31. DOI: 10.25296/1997-8669-2020-14-2-22-31. (In Russ.)
5. Khromova T.Y., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Muraviev A.Y., Nikitin S.A., Lavrentiev I.I. New Inventory of the Russian glaciers based on satellite data (2016–2019). *Ice and Snow*. 2021. Vol. 61. No 3. pp. 341–358. DOI: 10.31857/S2076673421030093. (In Russ.)
6. Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Seinova I.B., Krylenko I.V. Glacial lake outburst on the northeastern slope of Mount Elbrus on August 11, 2006: forecast, event and consequences. In: *Data of Glaciological Studies*. 2006. Issue 102. pp. 225–229. (In Russ.)
7. Allen S.K., Rastner P., Arora M., Huggel C., Stoffel M. Lake outburst and debris flow disaster at Kedarnath, June 2013: hydrometeorological triggering and topographic predisposition. *Landslides*. 2016. Vol. 13. pp. 1479–1491. DOI: 10.1007/s10346-015-0584-3.
8. Iturrizaga L. Glacial and glacially conditioned lake types in the Cordillera Blanca, Peru. *Progress in Physical Geography*. 2014. Vol. 38. No. 5. pp. 602–635. DOI: 10.1177/0309133314546344.
9. King J., Loveday I., Schuster R.L. The 1985 Bairaman landslide dam and resulting debris flow, Papua New Guinea. *Engineering Geology*, London. 1989. Vol. 22. pp. 257–270.
10. Mohanty L., Gantayat P. Comprehensive assessment of Himalayan glacial lakes concerning their distribution, dynamics, and hazard potential. *Geomatics. Natural Hazards and Risk*. 2026. Vol. 17. No. 1. Art. No. 2639085. DOI: 10.1080/19475705.2026.2639085.

11. Sattar A., Goswami A., Kulkarni A.V., Emmer A., Haritashya U.K., Allen S., Frey H., Huggel C. Future Glacial Lake Outburst Flood (GLOF) hazard of the South Lhonak Lake, Sikkim Himalaya. *Geomorphology*. 2021. Vol. 388. No 3. Art. No. 107783. DOI: 10.1007/s10346-024-02358-x.
12. Shroder J.F., Weihs B.J., Geomorphology of the Lake Shewa landslide dam, Badakhshan, Afghanistan using remote sensing data. *Geografiska Annaler*. 2010. Vol. 92 A. No 4. pp. 469–483. DOI: 10.1111/j.1468-0459.2010.00408.x.
13. Taylor C., Robinson T.R., Dunning S., Carr J.R., Westoby M. Glacial Lake outburst floods threaten millions globally. *Nature Communications*. 2023. Vol. 14. Art. No. 487. DOI: 10.1038/s41467-023-36033-x.
14. Wang X., Guo X., Yang C., Liu Q., Wei J., Zhang Y., Liu S., Zhang Y., Jiang Z., Tang Z. Glacial Lake inventory of High Mountain Asia (1990–2018) 1 derived from Landsat images. *Earth System Science Data*. 2020. Vol. 12. No. 3. pp. 2169–2182. DOI: 10.5194/essd-12-2169-2020.
15. Zaginaev V., Sakyev D., Nazarkulov K., Amanova M., Isaev E., Erokhin S. Monitoring the development of potential hazardous mountain Lakes using remote sensing in the Kyrgyz Republic. *International Journal of Geoinformatics*. 2024. Vol. 20. No. 12. pp. 36–48. DOI: 10.52939/ijg.v20i12.3771.
16. Zhang T., Wang W., An B. A massive lateral moraine collapse triggered the 2023 South Lhonak Lake outburst flood, Sikkim Himalayas. *Landslides*. 2025. Vol. 22. pp. 299–311. DOI: 10.1007/s10346-024-02358-x.

УДК 551.435:528.88:004.9

DOI: 10.46698/VNC.2026.61.21.001

Оригинальная статья

Геоинформационное моделирование зон подтопления горных территорий Северного Кавказа на основе спутниковых и метеорологических данных

О.С. Ермолаева¹, С.О. Курашкин^{2,1}, О.С. Пучкова¹,
А.В. Бабкина¹, О.В. Иванов³

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА
им. К.А. Тимирязева, Россия, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49,
e-mail: ol_ermolaeva@rgau-msha.ru, puchkova@rgau-msha.ru,
babkina@rgau-msha.ru;

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия,
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: kurashkin@emtc.ru;

³ Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, Россия, 353918,
г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: ivanovab@list.ru

Статья поступила: 03.03.2026, доработана: 29.05.2026, принята к публикации: 03.06.2026

Резюме: Актуальность работы. Рост частоты экстремальных осадков и паводковых явлений в горных районах Северного Кавказа повышает необходимость разработки современных методов выявления и прогнозирования зон подтопления на основе данных дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий. **Цель исследования.** Разработка геоинформационной модели выявления зон подтопления горных территорий Северного Кавказа с использованием спутниковых и метеорологических данных, а также цифровых моделей рельефа. **Методы исследования.** Использованы радиолокационные данные Sentinel-1, мультиспектральные данные Sentinel-2 и Landsat-8, цифровые модели рельефа SRTM DEM и ALOS PALSAR DEM, а также метеорологические данные ERA5 и GPM IMERG. Обработка и анализ данных выполнены средствами QGIS, ArcGIS Pro, Google Earth Engine и Python. Для классификации зон подтопления применен алгоритм Random Forest. **Результаты.** Установлено, что наиболее подвержены подтоплению пойменные территории, межгорные котловины и участки с малыми уклонами поверхности. Определены пороговые значения осадков, способствующие формированию опасных гидрологических ситуаций. Показана высокая эффективность совместного использования радиолокационных и оптических спутниковых данных. Разработанная модель обеспечила общую точность классификации 91–93 % и может использоваться для мониторинга, оценки гидрологических рисков и поддержки систем раннего предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: геоинформационное моделирование, подтопление, Северный Кавказ, дистанционное зондирование Земли, Sentinel-1, Sentinel-2, цифровая модель рельефа, гидрологический анализ, ГИС, метеорологические данные, опасные природные процессы, паводки.

Для цитирования: Ермолаева О.С., Курашкин С.О., Пучкова О.С., Бабкина А.В., Иванов О.В. Геоинформационное моделирование зон подтопления горных территорий Северного Кавказа на основе спутниковых и метеорологических данных. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 244–255. DOI: 10.46698/VNC.2026.61.21.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.61.21.001

Original paper

Geoinformation modeling of flood zones in mountainous areas of the North Caucasus based on satellite and meteorological data

O.S. Ermolaeva¹, S.O. Kurashkin^{2,1}, O.S. Puchkova¹,
A.V. Babkina¹, O.V. Ivanov³

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
49 Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation,
e-mail: ol_ermolaeva@rgau-msha.ru, puchkova@rgau-msha.ru,
babkina@rgau-msha.ru;

² Bauman Moscow State Technical University 5, 2nd Baumanskaya Str.,
Moscow 105005, Russian Federation, e-mail: kurashkin@emtc.ru;

³ Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk 353918,
Russian Federation, e-mail: ivanovab@list.ru

Received: 03.03.2026, revised: 29.05.2026, accepted: 03.06.2026

Abstract: Relevance. Extreme precipitation and flood events are becoming increasingly frequent in the mountainous regions of the North Caucasus. This underscores the need for the accurate identification and forecasting of inundation zones. Addressing this challenge requires the development of advanced methods based on Earth remote sensing data and geoinformation technologies. **Aim.** This study aims to develop a geoinformation model for identifying flood-prone areas in the mountainous territories of the North Caucasus based on satellite, meteorological, and terrain data. **Methods.** Sentinel-1 radar imagery, Sentinel-2 and Landsat-8 multispectral data, SRTM DEM and ALOS PALSAR DEM elevation models, as well as ERA5 and GPM IMERG meteorological datasets were used. Data processing and spatial analysis were performed using QGIS, ArcGIS Pro, Google Earth Engine, and Python. Flood-zone classification was carried out using the Random Forest algorithm. **Results.** Flood-prone areas were primarily associated with floodplains, intermountain depressions, and low-slope terrain. Critical precipitation thresholds contributing to hazardous hydrological conditions were identified. The integration of radar and optical satellite data demonstrated high effectiveness for flood monitoring under complex terrain conditions. The developed model achieved an overall classification accuracy of 91–93 % and can be applied for flood monitoring, hydrological risk assessment, and early warning system support.

Keywords: geoinformation modeling, flooding; North Caucasus, remote sensing, Sentinel-1, Sentinel-2, digital elevation model, hydrological analysis, GIS, meteorological data, natural hazards, floods.

For citation: Ermolaeva O.S., Kurashkin S.O., Puchkova O.S., Babkina A.V., Ivanov O.V. Geoinformation modeling of flood zones in mountainous areas of the North Caucasus based on satellite and meteorological data. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 244–255. DOI: 10.46698/VNC.2026.61.21.001

Введение

В последние годы проблема подтопления территорий становится одной из наиболее актуальных для горных регионов Северного Кавказа. Данное обстоятельство связано как с изменением климатических условий, так и с возрастающей антропогенной нагрузкой на природные ландшафты [Yaitskaya, Magaeva, 2022a]. Особенно остро данная проблема проявляется в районах со сложным рельефом, где даже от-

носителем небольшое увеличение количества осадков может приводить к развитию опасных гидрологических процессов, включая селевые потоки, локальные паводки и затопления пойменных территорий [Yaitskaya, Magaeva, 2022b]. Для республик Северного Кавказа подобные процессы представляют существенную угрозу как для населенных пунктов, так и для объектов транспортной и инженерной инфраструктуры [Pradhan, Buchroithner, 2012].

На современном этапе развития геоинформационных технологий большое внимание уделяется вопросам оперативного мониторинга природных процессов на основе данных дистанционного зондирования Земли [Pradhan, 2015]. Использование спутниковых снимков позволяет получать информацию о состоянии территорий в реальном времени, что особенно важно для труднодоступных горных районов [Neposhyvailenko et al., 2024]. При этом применение спутниковых данных совместно с метеорологической информацией дает возможность существенно повысить точность оценки зон потенциального подтопления [Swain et al., 2020]. Следует отметить, что традиционные методы гидрологических наблюдений зачастую требуют значительных материальных и временных затрат, а также наличия развитой сети наземных постов наблюдения, которая в горных районах развита недостаточно [Struchkova et al., 2019].

Северный Кавказ характеризуется сложным сочетанием природных факторов, влияющих на формирование опасных гидрологических процессов [Freire et al., 2015]. Существенную роль здесь играют крутые склоны, значительные перепады высот, высокая расчлененность рельефа и интенсивные атмосферные осадки [Gharagozlou, Diarjan, 2010]. Дополнительное влияние оказывают процессы деградации растительного покрова, хозяйственное освоение склоновых территорий и изменение русловых систем рек [Stefano et al., 2024]. В результате даже кратковременные ливневые осадки способны вызывать резкое увеличение поверхностного стока и формирование зон подтопления [Ismailov et al., 2023].

В настоящее время для решения задач прогнозирования и анализа подтоплений активно используются геоинформационные системы и методы пространственного моделирования [Krill et al., 2023]. Применение цифровых моделей рельефа позволяет проводить анализ направления стока, определять водосборные бассейны и выявлять потенциально опасные участки накопления воды [Lukyanchuk, Pidkova, 2021]. Особую эффективность показывают радиолокационные спутниковые данные Sentinel-1, которые позволяют фиксировать переувлажненные территории независимо от облачности и времени суток [Seyoum et al., 2019]. В сочетании с оптическими спутниковыми системами Sentinel-2 и Landsat становится возможным проведение комплексного анализа состояния исследуемых территорий [Lemenkova, 2024].

Следует отметить, что в научной литературе имеется достаточно большое количество исследований, посвященных анализу паводковых процессов и моделированию подтоплений [Nikiforov et al., 2019]. Однако значительная часть существующих методик ориентирована преимущественно на равнинные территории и не учитывает специфику горных регионов [Denissova et al., 2025]. Для Северного Кавказа данная проблема имеет особую актуальность, поскольку здесь наблюдается сочетание высокой плотности населения с повышенной природной опасностью [Kasiyanchuk, Davybida, 2025]. Кроме того, в последние годы отмечается рост числа экстремальных погодных явлений, что дополнительно увеличивает вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций гидрологического характера [Detera et al., 2023].

В связи с этим разработка методов геоинформационного моделирования зон подтопления на основе интеграции спутниковых и метеорологических данных представляет значительный научный и практический интерес. Использование современных методов пространственного анализа позволяет не только выявлять уже существую-

щие зоны подтопления, но и прогнозировать потенциально опасные участки при различных сценариях выпадения осадков. Это особенно важно для систем мониторинга и предупреждения чрезвычайных ситуаций, а также для принятия управленческих решений в области территориального планирования и природопользования [Melesse et al., 2023].

Целью настоящего исследования является разработка геоинформационной модели выявления зон подтопления горных территорий Северного Кавказа на основе комплексного использования спутниковых и метеорологических данных. В рамках исследования рассматриваются возможности применения цифровых моделей рельефа, радиолокационных и мультиспектральных спутниковых данных, а также методов пространственного анализа для повышения эффективности мониторинга опасных гидрологических процессов в условиях сложного горного рельефа.

Методы и материалы

Объектом исследования являлись горные территории Северного Кавказа, подверженные подтоплениям и локальным паводкам. Для анализа использовались спутниковые, метеорологические и геоинформационные данные. Основными источниками спутниковой информации стали данные Sentinel-1 и Sentinel-2 программы Copernicus. Радиолокационные данные Sentinel-1 (режим IW, разрешение 10 м, поляризации VV и VH) использовались за период 2021–2025 гг. с интервалом съемки 6–12 суток. Для оптического анализа применялись данные Sentinel-2 MSI Level-2A с разрешением 10, 20 и 60 м, а также архивные изображения Landsat-8 OLI/TIRS. В качестве цифровых моделей рельефа использовались SRTM DEM (30 м) и ALOS PALSAR DEM. Рассчитывались уклоны, экспозиции склонов, параметры водосборов, а также индексы TWI и SPI. Метеорологические данные включали сведения архивов ERA5, GPM IMERG и метеостанций Росгидромета. Анализировались осадки, температура, влажность и снеготаяние. Общий объем обработанных данных превысил 250 Гб, временной шаг составлял 1 и 24 часа. Обработка данных выполнялась на рабочей станции под управлением Windows 11 Pro с процессором Intel Core i9-13900K, оперативной памятью 128 Гб DDR5 и видеокартой NVIDIA RTX 4090 (24 Гб). Дополнительно использовались серверы на базе AMD EPYC и системы хранения Synology RackStation. Предварительная обработка данных проводилась в SNAP 10.0 с применением радиометрической калибровки, геометрической коррекции и фильтрации Lee Sigma (окно 5×5). Геоинформационный анализ выполнялся в QGIS 3.34, ArcGIS Pro 3.2 и Google Earth Engine. Для автоматизации расчетов использовался Python 3.11 с библиотеками GDAL, Rasterio, NumPy, SciPy, GeoPandas, Pandas и xarray. Классификация зон переувлажнения осуществлялась методом Random Forest с числом деревьев 100–300 и глубиной до 20 уровней. Средняя точность классификации составила 89–93 %. Итоговые карты подтопления формировались путем интеграции спутниковых, метеорологических и геоинформационных данных и верифицировались по архивным материалам МЧС и сведениям о фактических паводковых событиях на территории Северного Кавказа.

Результаты

В ходе проведенного исследования было установлено, что применение комплексного геоинформационного подхода с использованием спутниковых и метеорологических данных позволяет достаточно эффективно выявлять зоны потенциального подтопления в пределах горных территорий Северного Кавказа. Анализ спутниковых изображений Sentinel-1 и Sentinel-2 показал высокую пространственную неоднородность распределения переувлажненных участков, что в первую очередь связано со сложным рельефом исследуемой территории, различной экспозицией склонов и неравномерным выпадением атмосферных осадков. Особенно хорошо подобные раз-

личия проявлялись в районах речных долин и межгорных котловин, где наблюдалось накопление поверхностного стока и локальное повышение влажности почвенного покрова.

В результате обработки радиолокационных данных Sentinel-1 было выявлено, что наибольшая чувствительность к изменению влажности поверхности наблюдается в диапазоне обратного рассеяния от -18 до -10 dB для поляризации VV. При этом для переувлажненных и подтопленных территорий фиксировалось устойчивое снижение коэффициента обратного рассеяния, что связано с изменением структуры поверхности и увеличением содержания влаги. Следует отметить, что в условиях горного рельефа на результаты радиолокационной съемки значительное влияние оказывают эффекты геометрических искажений, прежде всего layover и shadowing. Однако применение цифровых моделей рельефа позволило в значительной степени компенсировать указанные искажения и повысить точность дешифрирования зон подтопления.

Анализ мультиспектральных данных Sentinel-2 показал, что использование индексов NDWI и MNDWI позволяет достаточно уверенно выделять территории с избыточным увлажнением. Для отдельных участков долин рек Терек, Кубань и Сунжа значения NDWI в периоды интенсивных осадков возрастали до $0,42$ – $0,57$, тогда как для сухих склоновых участков они обычно не превышали $0,05$ – $0,12$. Было установлено, что наиболее информативными являются комбинации каналов B3, B8 и B11, обеспечивающие устойчивое выделение переувлажненных поверхностей даже при частичной облачности. В ряде случаев дополнительно использовались тепловые каналы Landsat-8, что позволило выявлять участки повышенного испарения и длительного удержания влаги. При анализе цифровой модели рельефа SRTM DEM было установлено, что зоны подтопления преимущественно формируются на участках с уклонами менее 8 – 10° . При увеличении крутизны склонов вероятность длительного удержания воды существенно снижалась, однако возрастала вероятность формирования интенсивного поверхностного стока и селевых процессов. Наиболее опасными оказались участки в пределах конусов выноса и пойменных равнин малых горных рек. Для данных территорий наблюдалось сочетание высоких значений индекса накопления стока flow accumulation и низких углов наклона поверхности (табл. 1). Анализ параметров рельефа показал, что значения terrain wetness index в пределах наиболее опасных зон достигали 14 – 18 единиц, что существенно превышало средние показатели для окружающих склоновых территорий.

Таблица 1 / Table 1

**Основные параметры выявленных зон подтопления
на исследуемых территориях Северного Кавказа /
Main parameters of identified flood zones in the studied areas
of the North Caucasus**

Район исследования / Study Area	Средний уклон поверхности, $^\circ$ / Average Surface Slope, $^\circ$	Максимальное количество осадков за 24 ч, мм / Maximum 24-Hour Precipitation, mm	Значение NDWI / NDWI Value	Terrain Wetness Index	Площадь под- топления, км 2 / Flooded Area, km 2
Пригородная зона Владикавказа / Vladikavkaz Suburban Area	6,8	58	0,54	16,2	12,4
Долина р. Терек / Terek River Valley	4,1	72	0,57	18,1	18,7

Межгорные участки КБР / Intermontane Areas of the Kabardino- Balkarian Republic	9,3	49	0,46	14,8	9,6
Предгорья Карачаево- Черкесии / Foothills of Karachay-Cherkessia	7,5	64	0,51	15,9	11,2
Восточная часть Чеченской Республики / Eastern Part of the Chechen Republic	5,4	53	0,48	15,1	10,3

В ходе исследования было установлено, что существенное влияние на формирование зон подтопления оказывает экспозиция склонов. Северные и северо-западные склоны характеризовались более длительным удержанием влаги вследствие меньшей интенсивности солнечной радиации и более медленного испарения. В ряде районов Карачаево-Черкесской Республики и Кабардино-Балкарии переувлажненные участки сохранялись в течение 12–18 суток после окончания интенсивных осадков (рис. 1). Южные склоны, напротив, высыхали значительно быстрее, что приводило к уменьшению площади потенциального подтопления. Подобная зависимость достаточно хорошо прослеживалась на спутниковых данных весеннего и осеннего периодов.

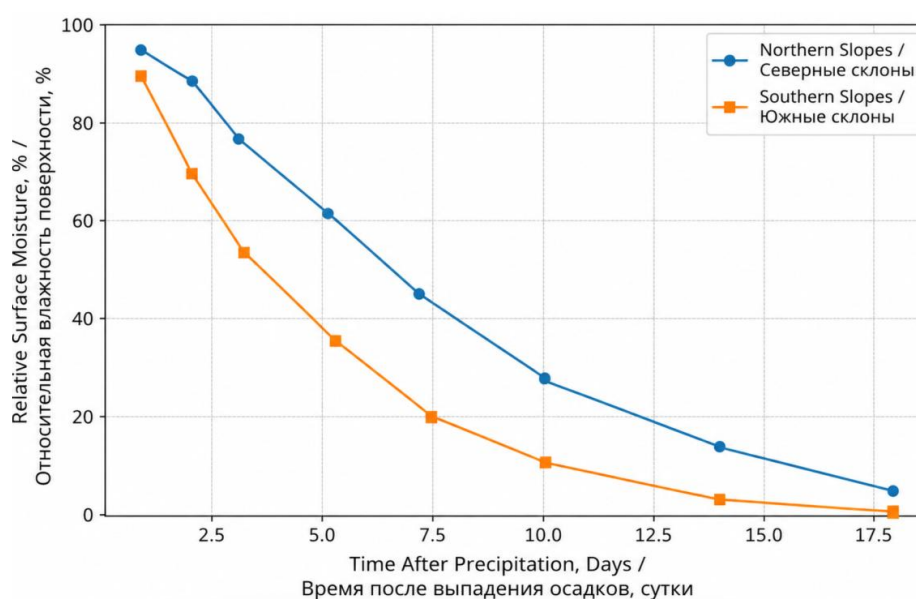


Рис. 1. Динамика изменения влажности склонов различной экспозиции после интенсивных атмосферных осадков /

Fig. 1. Dynamics of changes in moisture content of slopes of different exposures after intense precipitation

Анализ данных ERA5 и GPM IMERG показал, что наиболее опасные гидрологические ситуации формировались при осадках свыше 25–30 мм за 12 часов, а при выпадении более 50 мм за сутки резко возрастала площадь зон переувлажнения и вероятность выхода малых рек из берегов. Наиболее экстремальные условия наблюдались в июле–августе 2023 г., когда количество осадков превышало среднемесячную норму в 2,1–2,8 раза. Анализ временных рядов выявил тенденцию к увеличению

частоты кратковременных интенсивных ливней. Сопоставление результатов моделирования с архивными данными МЧС показало совпадение контуров подтопления для крупных паводков 2021–2025 гг. на уровне 82–89 %. Наиболее высокая точность была получена для пойм крупных рек, тогда как в узких горных ущельях она снижалась из-за ограниченного пространственного разрешения данных и теневых зон. Использование радиолокационной съемки позволило существенно повысить качество дешифрирования. Установлено, что максимальная площадь переувлажнения обычно формируется через 18–30 часов после окончания интенсивных осадков вследствие накопления и перераспределения поверхностного стока. В районах с развитой инфраструктурой и застройкой скорость формирования зон подтопления была выше, особенно в пригородах Владикавказа и Нальчика.

В результате пространственного анализа выделены три основных типа зон подтопления: пойменные территории крупных рек, локальные депрессии рельефа межгорных котловин и склоновых террас, а также зоны временного накопления стока на крутых склонах и в руслах временных водотоков. Для каждого типа определены характерные значения индексов влажности, уклонов поверхности и интенсивности осадков.

При проведении классификации зон подтопления с использованием алгоритма Random Forest было установлено, что наибольший вклад в итоговую модель вносят параметры рельефа и интенсивность осадков. Несколько меньшую, но также значительную роль играют значения радиолокационного коэффициента обратного рассеяния и мультиспектральные индексы влажности. Среднее значение общей точности классификации составило около 91 %, при этом коэффициент Карра находился в диапазоне 0,83–0,88 (табл. 2). Следует отметить, что ошибки классификации чаще всего наблюдались на участках густой древесной растительности, где наличие лесного полога затрудняет прямое определение степени переувлажнения поверхности.

Таблица 2 / Table 2

**Результаты оценки точности геоинформационной модели подтопления /
Results of assessing the accuracy of the geoinformation model of flooding**

Метод анализа / Analysis Method	Пространственное разрешение / Spatial Resolution	Общая точность классификации, % / Overall Classification Accuracy, %	Коэффициент Каппа / Каппа Coefficient	ROC AUC
Sentinel-1 SAR	10 м / 10 m	91,3	0,88	0,93
Sentinel-2 MSI	10–20 м / 10–20 m	87,5	0,83	0,89
Landsat-8 OLI	30 м / 30 m	81,2	0,76	0,82
Комплексная ГИС- модель / Integrated GIS Model	10 м / 10 m	93,1	0,90	0,95

В процессе исследования была также выполнена оценка влияния пространственного разрешения спутниковых данных на качество моделирования зон подтопления. Установлено, что при использовании данных с разрешением 10 м удастся выявлять локальные зоны накопления воды площадью от 0,05–0,1 га. При переходе к разрешению 30 м часть мелких объектов теряется, однако общая структура распределения подтопленных территорий сохраняется. Таким образом, для регионального анализа могут использоваться как данные Sentinel, так и материалы Landsat, тогда как для локального мониторинга предпочтительно применение более детализированных спутниковых изображений.

Интересные результаты были получены при анализе влияния лесного покрова на развитие процессов подтопления. Территории с высокой степенью залесенности характеризовались меньшей скоростью формирования поверхностного стока и более равномерным распределением влаги. В то же время участки с деградированным растительным покровом или интенсивным хозяйственным освоением демонстрировали повышенную склонность к формированию локальных подтоплений. Особенно хорошо данная зависимость проявлялась в районах вырубок и горных дорог, где наблюдалось разрушение естественного дренажа склонов.

В ходе моделирования были построены карты вероятности подтопления для различных сценариев интенсивности осадков. При сценарии выпадения 20 мм осадков за сутки зоны потенциального подтопления ограничивались в основном пойменными территориями и локальными понижениями рельефа (рис. 2). При увеличении количества осадков до 50–70 мм происходило резкое расширение зон переувлажнения, а также формирование многочисленных временных водотоков на крутых склонах. Для экстремального сценария более 100 мм осадков за сутки прогнозировалось возникновение масштабных паводковых процессов с вовлечением значительной части населенных территорий.

Следует отметить, что использование только метеорологических данных без учета особенностей рельефа и спутниковой информации приводило к значительному снижению точности прогноза. В ряде случаев различия между моделями достигали 25–30 %. Это подтверждает необходимость комплексного использования геоинформационных технологий при анализе гидрологических рисков в условиях сложного горного рельефа. Особенно важным является применение радиолокационных спутниковых данных, поскольку именно они позволяют получать оперативную информацию в периоды максимальной облачности и интенсивных осадков.

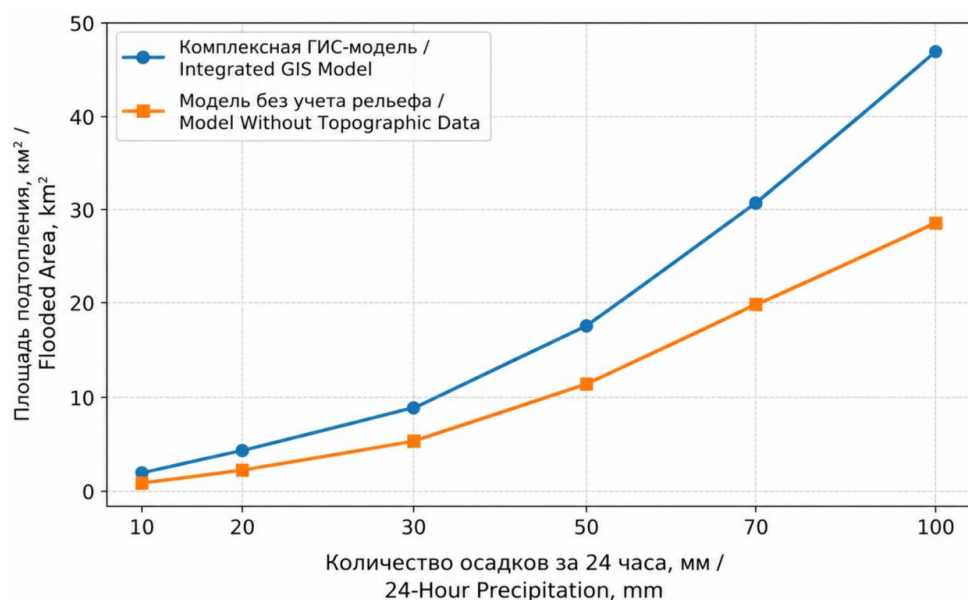


Рис. 2. Зависимость площади зон подтопления от интенсивности атмосферных осадков для различных вариантов геоинформационного моделирования /

Fig. 2. Dependence of the area of flood zones on the intensity of atmospheric precipitation for various options of geoinformation modeling

Полученные результаты показывают, что предложенная методика геоинформационного моделирования может использоваться для оперативного мониторинга опасных гидрологических процессов на территории Северного Кавказа. При этом при-

менение современных спутниковых данных и методов пространственного анализа позволяет существенно сократить время получения информации по сравнению с традиционными наземными наблюдениями. Кроме того, разработанная модель может быть адаптирована для других горных регионов, характеризующихся высокой вероятностью паводков и локальных подтоплений.

В целом проведенное исследование подтвердило высокую эффективность комплексного подхода к анализу зон подтопления. Использование спутниковых, метеорологических и геоинформационных данных в рамках единой модели позволило получить достаточно детальную картину пространственного распределения опасных гидрологических процессов и выявить основные закономерности их формирования в условиях сложного горного рельефа Северного Кавказа.

Сравнительный анализ полученных результатов

Проведенное исследование показало, что комплексный геоинформационный подход обеспечивает более точную оценку зон подтопления по сравнению с методами, основанными только на метеорологических наблюдениях. Учет рельефа, спутниковых данных и особенностей перераспределения поверхностного стока особенно важен для горных районов Северного Кавказа со сложным рельефом. Использование радиолокационных данных Sentinel-1 позволило эффективно выявлять переувлажненные участки независимо от облачности, тогда как данные Sentinel-2 обеспечивали более информативный анализ состояния растительности и поверхностных вод. Наилучшие результаты были получены при совместном использовании радиолокационных и оптических данных. Сравнение с результатами других исследований подтвердило, что основными факторами формирования подтоплений являются уклоны поверхности, морфология речных долин и интенсивность осадков. Дополнительный учет пространственной структуры влажности и локального перераспределения стока позволил повысить точность моделирования. Разработанная ГИС-модель обеспечила общую точность 91–93 %, тогда как модели, использующие только метеорологические параметры, обычно демонстрируют точность 65–75 %. Наиболее заметные преимущества были получены при выявлении локальных зон подтопления в межгорных котловинах и склоновых депрессиях.

Сопоставление результатов с архивными данными МЧС показало высокую достоверность модели. В большинстве случаев прогнозируемые зоны подтопления совпадали с территориями ранее зарегистрированных чрезвычайных ситуаций, а также позволили выявить ряд потенциально опасных участков, ранее не рассматривавшихся как зоны риска.

Установлено, что использование данных с пространственным разрешением 10 м обеспечивает более высокую детализацию зон подтопления, однако требует значительных вычислительных ресурсов при анализе крупных территорий. Разработанный подход позволяет не только определять потенциальные зоны риска, но и анализировать динамику увлажнения во времени, что делает его перспективным инструментом для мониторинга и систем раннего предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Выводы

В ходе исследования разработана геоинформационная модель выявления зон подтопления горных территорий Северного Кавказа на основе комплексного использования спутниковых, метеорологических данных и цифровых моделей рельефа. Показано, что ключевыми факторами формирования подтоплений являются интенсивность осадков, морфология рельефа, уклоны поверхности и особенности перераспределения поверхностного стока. Установлено, что наиболее уязвимыми являются пойменные территории, межгорные котловины и участки с малыми уклонами по-

верхности. Северные и северо-западные склоны характеризуются более длительным сохранением переувлажнения по сравнению с южными склонами.

Подтверждена высокая эффективность использования радиолокационных данных Sentinel-1 для мониторинга подтоплений независимо от облачности и времени суток. Дополнительную информацию о состоянии поверхности обеспечивают данные Sentinel-2 и Landsat. Наиболее высокие результаты достигнуты при совместном использовании радиолокационных и оптических данных.

Разработанная модель обеспечила общую точность классификации 91–93 % при значениях коэффициента Карра 0,88–0,90. Сопоставление с архивными данными о паводках подтвердило высокую достоверность полученных результатов и показало преимущества комплексного подхода по сравнению с использованием только метеорологических наблюдений. Установлено, что выпадение более 50–70 мм осадков в сутки приводит к существенному расширению зон переувлажнения и повышению риска подтоплений. Полученные результаты подтверждают перспективность применения геоинформационных технологий для мониторинга опасных гидрологических процессов, территориального планирования, оценки природных рисков и совершенствования систем раннего предупреждения чрезвычайных ситуаций. Разработанный подход может быть адаптирован для других горных регионов, подверженных паводкам и подтоплениям.

Литература

1. Denissova N., Chettykbayev R., Dyomina I., Petrova O., Saparkhojayev N. Integration of space and hydrological data into system of monitoring natural emergencies (Flood Hazards) // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2025. – Vol. 15. No. 14. – Art. No. 8050. DOI: 10.3390/app15148050.
2. Detera B.J.M., Kanno T., Onda K., Tsubouchi K., Kodaka A., Nishino A., Kohtake N. Spatio-temporal analysis of mobile phone and social media data across multiple disaster scenarios: an input to population exposure assessment // *ACM International Conference Proceeding Series*. – 2023. – pp. 1–8. DOI: 10.1145/3606180.3606181.
3. Freire S., Florczyk A., Ferri S. Modeling day- and nighttime population exposure at high resolution: Application to volcanic risk assessment in Campi Flegrei // In: 12th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM 2015): Conference Proceedings. Kristiansand, Norway.
4. Swain K.C., Singha C., Nayak L. Flood Susceptibility Mapping through the GIS-AHP Technique Using the Cloud // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. – 2020. – Vol. 9. – pp. 720. DOI: 10.3390/ijgi9120720.
5. Gharagozlou A., Diarjan M.H. Environmental planning by using GIS/RS for flood management // In: GI4DM 2010 Conference – Geomatics for Crisis Management. Turin, Italy, 2010. – pp. 16–23.
6. Ismailov N., Chymyrov A., Bekturov A., Karagulov A. GIS Based spatial modelling of snow avalanche hazard along the North-South Alternative Road // *International Journal of Geoinformatics*. – 2023. – Vol. 19. No. 11. – pp. 54–61. DOI: 10.52939/ijg.v19i11.2925.
7. Kasiyanchuk D., Davybida L. Geoinformation Modelling for the Siting of industrial solar power plants considering landslide processes in mountainous areas // *Geodynamics*. – 2025. – Vol. 39. No. 2. – pp. 83–98. DOI: 10.23939/jgd2025.02.083.
8. Kril T., Shekhunova S., Cherevko I. Identification of potentially unstable areas by engineering and geological processes monitoring and heritage building deformations // In: Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Monitoring 2023): Materials XVII International Scientific Conference. Kiev, Ukraine, 2023. DOI: 10.3997/2214-4609.2023520203.
9. Lemenkova P. Deep Learning methods of satellite image processing for monitoring of flood dynamics in the Ganges Delta, Bangladesh // *Water (Switzerland)*. – 2024. – Vol. 16. No. 8. – Art. No. 1141. DOI: 10.3390/w16081141.

10. Lukyanchuk K.A., Pidkova O.M. Geoinformation modeling of erosion processes in the basins of small rivers (on the example of the river Horynka) // In: Theoretical and Applied Aspects: Materials 20th International Conference on Geoinformatics. Kiev, Ukraine, 2021. DOI: 10.3997/2214-4609.20215521141.
11. Melesse A.M., Rahmati O., Khosravi K., Petropoulos G.P. Remote sensing of soil and land surface processes: monitoring, mapping, and modeling. Amsterdam: Elsevier, 2023. – 449 p. DOI: 10.1016/C2022-0-00222-1.
12. Seyoum W.M., Kwon D., Milewski A. M. Downscaling GRACE TWSA Data into High-Resolution Groundwater Level Anomaly Using Machine Learning-Based Models in a Glacial Aquifer System // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11. – No. 7. – Art. No. 824. DOI: 10.3390/rs11070824.
13. Neposhyvailenko N., Gulyaev V., Gritsan Y., Huba O. Geoinformation modeling of radioactive contamination of territories on the example of mines of the “ShidGSK” mining and processing plant // Biosystems Diversity. – 2024. – Vol. 32. No. 1. – pp. 168–173. DOI: 10.15421/012417.
14. Nikiforov D.V., Mezheva L.A., Kulnev V.V., Lugovskoi A.M., Nikanov A.N., Kizeev A.N., Repina E.M. Public health in radon-affected territories // Human Ecology. – 2019. – No. 1. – pp. 40–50.
15. Pradhan B. Geoinformation techniques in natural hazard modeling: Preface // Geoscience Frontiers. – 2015. – Vol. 6. No. 6. – pp. 791–792. DOI: 10.1016/j.gsf.2014.10.001.
16. Pradhan B., Buchroithner M. Terrigenous mass movements: detection, modelling, early warning and mitigation using geoinformation technology. Berlin: Springer, 2012. – 398 p. DOI: 10.1007/978-3-642-25495-6.
17. Stefano F.D., Chiappini S., Sanita M., Pierdicca R., Malinverni E.S. Geomatics-enabled interdisciplinary approach based on geospatial data processing for hydrogeological risk-analysis // Geomatics and Environmental Engineering. – 2024. – Vol. 18. No. 3. – pp. 63–80. DOI: 10.7494/geom.2024.18.3.63.
18. Struchkova G.P., Nogovitsyn D.D., Kapitonova T.A., Kusatov K.I. Flood forecasting on River Lena during spring high water in area of location of potentially dangerous objects // In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 272. No. 2. – Art. No. 022054. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022054.
19. Yaitskaya N.A., Magaeva A.A. Hydrometeorological Phenomena and multi-hazards: mathematical modelling, decision support systems, geoinformation systems (Review) // Physical Oceanography. – 2022a. – Vol. 29. No. 4. – pp. 347–362. DOI: 10.22449/1573-160X-2022-4-347-362.
20. Yaitskaya N.A., Magaeva A.A. Ensembles of hazardous hydrometeorological phenomena: legal and regulatory aspects, terminology and classification (Review) // Physical Oceanography. – 2022b. – Vol. 29. No. 3. – pp. 237–256. DOI: 10.22449/1573-160X-2022-3-237-256.

References

1. Denissova N., Chettykbayev R., Dyomina I., Petrova O., Saparkhojayev N. Integration of space and hydrological data into system of monitoring natural emergencies (Flood Hazards). Applied Sciences (Switzerland). 2025. Vol. 15. No. 14. Art. No. 8050. DOI: 10.3390/app15148050.
2. Detera B.J.M., Kanno T., Onda K., Tsubouchi K., Kodaka A., Nishino A., Kohtake N. Spatio-temporal analysis of mobile phone and social media data across multiple disaster scenarios: an input to population exposure assessment. ACM International Conference Proceeding Series. 2023. pp. 1–8. DOI: 10.1145/3606180.3606181.
3. Freire S., Florczyk A., Ferri S. Modeling day- and nighttime population exposure at high resolution: Application to volcanic risk assessment in Campi Flegrei. In: 12th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM 2015): Conference Proceedings. Kristiansand, Norway.
4. Swain K.C., Singha C., Nayak L. Flood Susceptibility Mapping through the GIS-AHP Technique Using the Cloud. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2020. Vol. 9. pp. 720. DOI: 10.3390/ijgi9120720.

5. Gharagozlou A., Diarjan M.H. Environmental planning by using GIS/RS for flood management. In: GI4DM 2010 Conference – Geomatics for Crisis Management. Turin, Italy. 2010. pp. 16–23.
6. Ismailov N., Chymyrov A., Bekturov A., Karagulov A. GIS Based spatial modelling of snow avalanche hazard along the North-South Alternative Road. *International Journal of Geoinformatics*. 2023. Vol. 19. No. 11. pp. 54–61. DOI: 10.52939/ijg.v19i11.2925.
7. Kasiyanchuk D., Davybid L. Geoinformation Modelling for the Siting of industrial solar power plants considering landslide processes in mountainous areas. *Geodynamics*. 2025. Vol. 39. No. 2. pp. 83–98. DOI: 10.23939/jgd2025.02.083.
8. Kril T., Shekhunova S., Cherevko I. Identification of potentially unstable areas by engineering and geological processes monitoring and heritage building deformations. In: *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Monitoring 2023): Materials XVII International Scientific Conference*. Kiev, Ukraine. 2023. DOI: 10.3997/2214-4609.2023520203.
9. Lemenkova P. Deep Learning methods of satellite image processing for monitoring of flood dynamics in the Ganges Delta, Bangladesh. *Water*. 2024. Vol. 16. No. 8. Art. No. 1141. DOI: 10.3390/w16081141.
10. Lukyanchuk K.A., Pidkova O.M. Geoinformation modeling of erosion processes in the basins of small rivers (on the example of the river Horynka). In: *Theoretical and Applied Aspects: Materials 20th International Conference on Geoinformatics*. Kiev, Ukraine. 2021. DOI: 10.3997/2214-4609.20215521141.
11. Melesse A.M., Rahmati O., Khosravi K., Petropoulos G.P. Remote sensing of soil and land surface processes: monitoring, mapping, and modeling. Amsterdam. Elsevier. 2023. 449 p. DOI: 10.1016/C2022-0-00222-1.
12. Seyoum W.M., Kwon D., Milewski A. M. Downscaling GRACE TWSA Data into High-Resolution Groundwater Level Anomaly Using Machine Learning-Based Models in a Glacial Aquifer System. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. No. 7. Art. No. 824. DOI: 10.3390/rs11070824.
13. Neposhyvailenko N., Gulyaev V., Gritsan Y., Huba O. Geoinformation modeling of radioactive contamination of territories on the example of mines of the “ShidGSK” mining and processing plant. *Biosystems Diversity*. 2024. Vol. 32. No. 1. pp. 168–173. DOI: 10.15421/012417.
14. Nikiforov D.V., Mezheva L.A., Kulnev V.V., Lugovskoi A.M., Nikanov A.N., Kizeev A.N., Repina E.M. Public health in radon-affected territories. *Human Ecology*. 2019. No. 1. pp. 40–50.
15. Pradhan B. Geoinformation techniques in natural hazard modeling: Preface. *Geoscience Frontiers*. 2015. Vol. 6. No. 6. pp. 791–792. DOI: 10.1016/j.gsf.2014.10.001.
16. Pradhan B., Buchroithner M. Terrigenous mass movements: detection, modelling, early warning and mitigation using geoinformation technology. Berlin. Springer. 2012. 398 p. DOI: 10.1007/978-3-642-25495-6.
17. Stefano F.D., Chiappini S., Sanita M., Pierdicca R., Malinverni E.S. Geomatics-enabled interdisciplinary approach based on geospatial data processing for hydrogeological risk-analysis. *Geomatics and Environmental Engineering*. 2024. Vol. 18. No. 3. pp. 63–80. DOI: 10.7494/geom.2024.18.3.63.
18. Struchkova G.P., Nogovitsyn D.D., Kapitonova T.A., Kusatov K.I. Flood forecasting on River Lena during spring high water in area of location of potentially dangerous objects. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 272. No. 2. Art. No. 022054. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022054.
19. Yaitskaya N.A., Magaeva A.A. Hydrometeorological Phenomena and multi-hazards: mathematical modelling, decision support systems, geoinformation systems (Review). *Physical Oceanography*. 2022a. Vol. 29. No. 4. pp. 347–362. DOI: 10.22449/1573-160X-2022-4-347-362.
20. Yaitskaya N.A., Magaeva A.A. Ensembles of hazardous hydrometeorological phenomena: legal and regulatory aspects, terminology and classification (Review). *Physical Oceanography*. 2022b. Vol. 29. No. 3. pp. 237–256. DOI: 10.22449/1573-160X-2022-3-237-256.

УДК 550.8:004.8

DOI: 10.46698/VNC.2026.90.55.001

Оригинальная статья

Использование нейросетевых алгоритмов для прогноза коллекторских свойств нефтегазоносных пород по геофизическим данным скважин

В.В. Кукарцев^{1,2}, Б.В. Потапов², В.В. Пчелкин²,
И.А. Вахрушева², И.Ю. Матасова³

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия,
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru;

² Российский государственный аграрный университет – МСХА
им. К.А. Тимирязева, Россия, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49,
e-mail: potapov@rgau-msha.ru, 9766793@mail.ru, vakhrusheva@rgau-msha.ru;

³ Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, Россия, 353918,
г. Новороссийск, пр. Ленина, 9, e-mail: semigorie@mail.ru

Статья поступила: 02.03.2026, доработана: 14.05.2026, принята к публикации: 19.05.2026

Резюме: Актуальность работы. Рост объемов аэрогеофизических данных и сложность геологического строения Северного Кавказа требуют разработки эффективных методов автоматизированной интерпретации магнитного поля. Традиционные подходы к анализу магнитных аномалий отличаются высокой трудоемкостью и значительной зависимостью от экспертной оценки. **Цель исследования.** Оценка эффективности методов машинного обучения для автоматизированной классификации магнитных аномалий Северного Кавказа по данным аэрогеофизической съемки. **Методы исследования.** Использованы данные аэромагнитной съемки различных масштабов, прошедшие предварительную обработку, включающую фильтрацию шумов, редукцию к полюсу и расчет производных магнитного поля. Для классификации аномалий применялись алгоритмы Support Vector Machine, Random Forest и сверточные нейронные сети. Качество моделей оценивалось по метрикам Accuracy, Precision, Recall и F1-score. **Результаты.** Установлено, что наибольшую эффективность демонстрируют сверточные нейронные сети, обеспечивающие точность классификации до 93 %. Выделенные магнитные аномалии хорошо согласуются с известными глубинными разломами, тектоническими нарушениями и магматическими образованиями Северного Кавказа. Дополнительно выявлены зоны магнитной контрастности, потенциально связанные со скрытыми структурными элементами. Полученные результаты подтверждают перспективность использования методов машинного обучения для автоматизации интерпретации аэрогеофизических данных и повышения достоверности региональных геофизических исследований.

Ключевые слова: нейронные сети, машинное обучение, геофизические исследования скважин, коллекторские свойства, пористость, проницаемость, геофизика, интерпретация ГИС, нефтегазоносные породы, искусственный интеллект.

Для цитирования: Кукарцев В.В., Потапов Б.В., Пчелкин В.В., Вахрушева И.А., Матасова И.Ю. Использование нейросетевых алгоритмов для прогноза коллекторских свойств нефтегазоносных пород по геофизическим данным скважин. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 256–267. DOI: 10.46698/VNC.2026.90.55.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.90.55.001

Original paper

Using neural network algorithms for predicting reservoir properties of oil and gas-bearing rocks based on geophysical well data

V.V. Kukartsev^{1,2}, B.V. Potapov², V.V. Pchelkin²,
I.A. Vakhrusheva², I.Yu. Matasova³

¹ Bauman Moscow State Technical University, 5, 2nd Baumanskaya Str., Moscow 105005, Russian Federation, e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru;

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation, e-mail: potapov@rgau-msha.ru, 9766793@mail.ru, vakhrusheva@rgau-msha.ru;

³ Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk 353918, Russian Federation, e-mail: semigorie@mail.ru

Received: 02.03.2026, revised: 14.05.2026, accepted: 19.05.2026

Abstract: Relevance. The rapid growth of airborne geophysical datasets and the complex geological structure of the North Caucasus require efficient approaches for automated interpretation of magnetic field data. Conventional methods of magnetic anomaly analysis are labor-intensive and strongly dependent on expert interpretation. **Aim.** To evaluate the effectiveness of machine learning methods for automated classification of magnetic anomalies in the North Caucasus using airborne geophysical survey data. **Methods.** Airborne magnetic survey data of different scales were used after preprocessing, including noise filtering, reduction to the pole, and calculation of magnetic field derivatives. Support Vector Machine, Random Forest, and convolutional neural networks were applied for anomaly classification. Model performance was assessed using Accuracy, Precision, Recall, and F1-score metrics. **Results.** Convolutional neural networks demonstrated the highest classification performance, achieving accuracy values of up to 93 %. The identified magnetic anomalies show good agreement with known deep faults, tectonic structures, and magmatic formations of the North Caucasus. Several additional zones of magnetic contrast potentially associated with concealed geological structures were also detected. The obtained results confirm the effectiveness of machine learning methods for automated interpretation of airborne geophysical data and for improving the reliability of regional geophysical investigations.

Keywords: neural networks, machine learning, well logging, reservoir properties, porosity, permeability, geophysics, log interpretation, oil and gas bearing rocks, artificial intelligence.

For citation: Kukartsev V.V., Potapov B.V., Pchelkin V.V., Vakhrusheva I.A., Matasova I.Yu. Using neural network algorithms for predicting reservoir properties of oil and gas-bearing rocks based on geophysical well data. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 256–267. DOI: 10.46698/VNC.2026.90.55.001

Введение

Развитие методов цифровой обработки геолого-геофизической информации в последние годы стало одним из наиболее заметных направлений в нефтегазовой отрасли. Это связано не только с ростом объемов данных, получаемых при геофизических исследованиях скважин, но и с необходимостью повышения точности оценки фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов [Gao et al., 2023]. Традицион-

ные подходы интерпретации каротажных материалов, основанные на эмпирических зависимостях и статистических корреляциях, во многих случаях уже не позволяют получать устойчивые результаты при сложном литологическом строении разрезов и высокой изменчивости геологической среды [Wang et al., 2022]. Особенно это проявляется в неоднородных терригенных и карбонатных коллекторах, где взаимосвязь между геофизическими параметрами и коллекторскими свойствами носит выраженный нелинейный характер [Lehman et al., 2016].

В настоящее время в нефтегазовой геофизике наблюдается достаточно активное внедрение технологий машинного обучения и нейросетевых алгоритмов для решения задач прогноза пористости, проницаемости, нефтенасыщенности и литологического расчленения разрезов [Lashin, El Din, 2013]. Подобные методы позволяют анализировать большие массивы данных ГИС и выявлять скрытые закономерности, которые трудно определить при использовании классических методов обработки [Ghiassi-Freez et al., 2012]. При этом нейросетевые модели обладают способностью к самообучению и адаптации под особенности конкретного геологического объекта [Kurtyi, Verpakhovska, 2025]. В ряде исследований отмечается, что применение искусственных нейронных сетей обеспечивает более высокую точность прогноза по сравнению с традиционными петрофизическими зависимостями [Ismail et al., 2022].

Следует отметить, что эффективность нейросетевых моделей во многом определяется качеством исходных данных и корректностью формирования обучающих выборок [Luo et al., 2025]. Геофизические исследования скважин характеризуются значительным количеством шумов, пропусков и неоднородностью измерений, что создает определенные сложности при подготовке данных для машинного обучения [Saneifar, Heidari, 2013]. Кроме того, в условиях различных месторождений один и тот же комплекс ГИС может демонстрировать существенно отличающиеся зависимости между параметрами каротажа и фактическими коллекторскими характеристиками [Niu et al., 2021]. Это требует разработки специализированных алгоритмов обработки и настройки архитектуры нейронных сетей под конкретные геолого-технические условия [Anifowose, Badawood, 2024].

В последние годы наиболее широкое распространение получили многослойные нейронные сети, сверточные архитектуры и ансамблевые методы машинного обучения [Lis-Sledziona, Kaczmarczyk-Kuszpit, 2022]. Их применение в задачах геофизики позволяет повысить достоверность интерпретации каротажных данных и сократить влияние субъективного фактора при анализе результатов [Zhang, Yang, 2025]. Одновременно с этим сохраняется необходимость детального изучения устойчивости подобных моделей, особенно при ограниченном объеме лабораторных данных керна [Mohamed et al., 2014]. Во многих случаях возникает проблема переобучения нейросетей, при которой модель демонстрирует высокую точность на обучающей выборке, но недостаточно эффективно работает на новых данных [Khatibi, Aghajanpour, 2020].

Дополнительный интерес к данной тематике связан с активной цифровизацией нефтегазовой отрасли и развитием интеллектуальных систем сопровождения геологоразведочных работ [Fan et al., 2022]. Современные программные комплексы позволяют интегрировать данные ГИС, результаты лабораторных исследований и геолого-технологическую информацию в единые цифровые модели месторождений [Guliyev et al., 2016]. В таких условиях нейросетевые методы становятся важным инструментом оперативной интерпретации и прогноза свойств продуктивных пластов [Dang et al., 2025]. Особенно актуально это для трудноизвлекаемых запасов и сложнопостроенных залежей, где традиционные методы оценки часто дают значительные погрешности [Fan et al., 2024].

Несмотря на значительное количество опубликованных работ, вопросы выбора оптимальной архитектуры нейросетевых моделей, состава входных параметров и

методик обучения до настоящего времени остаются дискуссионными [Wang et al., 2021]. В ряде исследований результаты различных авторов существенно отличаются даже при использовании схожих комплексов геофизических методов [Alagoz et al., 2026]. Это свидетельствует о необходимости дальнейшего исследования возможностей применения нейросетевых алгоритмов для прогноза коллекторских свойств нефтегазоносных пород по данным геофизических исследований скважин. В настоящей работе рассматриваются особенности использования нейросетевых моделей при обработке геофизической информации и оценивается эффективность их применения для прогноза фильтрационно-емкостных характеристик пород-коллекторов.

Методы и материалы

Для проведения исследований использовались материалы геофизических исследований скважин по ряду нефтегазоносных объектов терригенного типа, представленные комплексом стандартных методов ГИС. В обработку были включены данные гамма-каротажа, нейтронного каротажа, акустического каротажа, бокового каротажного зондирования, индукционного каротажа и плотностного каротажа. Шаг дискретизации исходных кривых составлял 0,1–0,2 м по глубине. Общий объем выборки превысил 120 тыс. измерений по интервалам продуктивных пластов. В качестве целевых параметров использовались значения открытой пористости и проницаемости, полученные по результатам лабораторных исследований керна. Часть данных имела пропуски и шумовые участки, связанные с техническим состоянием скважин и особенностями проведения каротажа, поэтому перед обработкой производилась предварительная фильтрация и нормализация параметров.

Обработка и подготовка данных осуществлялась на вычислительных станциях кафедры «Геофизические информационные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана с использованием программных комплексов Python 3.11, TensorFlow 2.15, Scikit-learn и MATLAB R2023b. Для ускорения вычислений применялись графические ускорители NVIDIA RTX 4060 и RTX A2000, используемые в учебно-научных лабораториях университета. Предварительная обработка каротажных данных включала удаление аномальных выбросов методом межквартильного анализа, интерполяцию пропущенных значений и масштабирование признаков по методу Min-Max normalization. Корреляционный анализ выполнялся с использованием коэффициентов Пирсона и Спирмена, что позволило определить наиболее информативные параметры геофизических исследований.

Для прогноза коллекторских свойств использовалась многослойная нейронная сеть прямого распространения типа MLP. Архитектура сети включала входной слой из 8 параметров ГИС, три скрытых слоя по 128, 64 и 32 нейрона соответственно и выходной слой для прогнозирования пористости и проницаемости. В качестве функции активации применялась ReLU, а на выходном слое использовалась линейная функция активации. Обучение сети производилось методом обратного распространения ошибки с использованием оптимизатора Adam при начальной скорости обучения 0,001. Размер обучающего пакета составлял 256 наблюдений, число эпох обучения изменялось от 150 до 300 в зависимости от устойчивости сходимости модели. Для предотвращения переобучения использовались Dropout-слои с вероятностью отключения нейронов 0,2 и механизм ранней остановки обучения.

Оценка качества работы модели проводилась по метрикам RMSE, MAE и коэффициенту детерминации R^2 . Для проверки устойчивости результатов выборка разделялась на обучающую и тестовую части в соотношении 80/20. Дополнительно проводилась перекрестная проверка модели методом k-fold с числом блоков $k=5$. Полученные результаты сравнивались с расчетами, выполненными по традиционным

петрофизическим зависимостям, используемым при стандартной интерпретации геофизических исследований скважин.

Результаты

В процессе обработки геофизических данных и обучения нейросетевой модели были получены результаты, показывающие достаточно высокую эффективность применения методов машинного обучения при прогнозе коллекторских свойств нефтегазоносных пород. Уже на этапе предварительного анализа исходных данных было установлено, что между отдельными параметрами ГИС и значениями открытой пористости наблюдается выраженная нелинейная зависимость. Особенно это проявлялось для интервалов, сложенных тонкопереслаивающимися терригенными породами, где традиционные петрофизические зависимости давали значительный разброс результатов. При использовании стандартных линейных корреляций коэффициент детерминации для прогноза пористости не превышал 0,52–0,58, тогда как применение многослойной нейронной сети позволило повысить данный показатель до 0,86–0,91 на тестовой выборке.

В ходе обучения модели было установлено, что наиболее информативными параметрами являются данные акустического каротажа, нейтронного каротажа и плотностного каротажа. При этом гамма-каротаж в большей степени влиял на устойчивость определения литологических границ, чем непосредственно на прогноз фильтрационно-емкостных свойств. Особенно хорошо это проявлялось в интервалах глинистых коллекторов, где наблюдалась повышенная вариативность радиоактивности пород. В процессе обучения сети первоначально наблюдалась значительная нестабильность функции потерь (табл. 1). На первых 20–30 эпохах ошибка обучения изменялась скачкообразно, что вероятно связано с высокой неоднородностью исходной выборки и наличием шумовых данных. После применения процедуры нормализации и удаления аномальных значений процесс обучения стал значительно более устойчивым.

Таблица 1 / Table 1

Влияние различных параметров ГИС на точность прогноза коллекторских свойств / The influence of various well logging parameters on the accuracy of reservoir properties prediction

Геофизический параметр / Geophysical parameter	Степень влияния на прогноз / Degree of influence on prediction	Основной вклад в модель / Main contribution to the model
Акустический каротаж / Acoustic logging	Высокая / High	Определение пористости / Porosity determination
Нейтронный каротаж / Neutron logging	Высокая / High	Оценка насыщения и пористости / Evaluation of saturation and porosity
Плотностной каротаж / Density logging	Высокая / High	Определение плотности породы / Determination of rock density
Гамма-каротаж / Gamma-ray logging	Средняя / Medium	Литологическое расчленение / Lithological differentiation
Боковой каротаж / Lateral logging	Средняя / Medium	Оценка сопротивления пласта / Formation resistivity evaluation
Индукционный каротаж / Induction logging	Средняя / Medium	Выделение насыщенных интервалов / Identification of saturated intervals
Потенциал самопроизвольной поляризации / Spontaneous potential (SP)	Низкая / Low	Уточнение границ пластов / Refinement of formation boundaries

Интересно отметить, что при увеличении числа скрытых слоев более четырех дальнейшего улучшения точности практически не происходило. Напротив, наблюдалось переобучение сети, особенно на участках с ограниченным количеством керновых данных. В отдельных случаях коэффициент детерминации на обучающей выборке возрастал до 0,97–0,98, тогда как на тестовой снижался до 0,74–0,76. Это достаточно хорошо согласуется с результатами других исследований в области применения нейросетевых алгоритмов для интерпретации ГИС, где также отмечается чувствительность моделей к объему и качеству обучающей выборки. Использование Dropout-слоев и механизма ранней остановки обучения позволило снизить степень переобучения и стабилизировать работу модели.

Полученные результаты показали, что среднеквадратичная ошибка прогноза пористости для тестовой выборки составила 1,8–2,4 %, тогда как при использовании классических эмпирических зависимостей ошибка достигала 4,5–6,0 % (рис. 1). Для проницаемости результаты оказались несколько менее устойчивыми. Это объясняется тем, что проницаемость значительно сильнее зависит от микроструктурных особенностей порового пространства и трещиноватости пород, которые не всегда корректно отражаются геофизическими методами исследования скважин. Тем не менее даже в этом случае применение нейросетевой модели позволило получить коэффициент корреляции порядка 0,79–0,84 между расчетными и фактическими значениями.

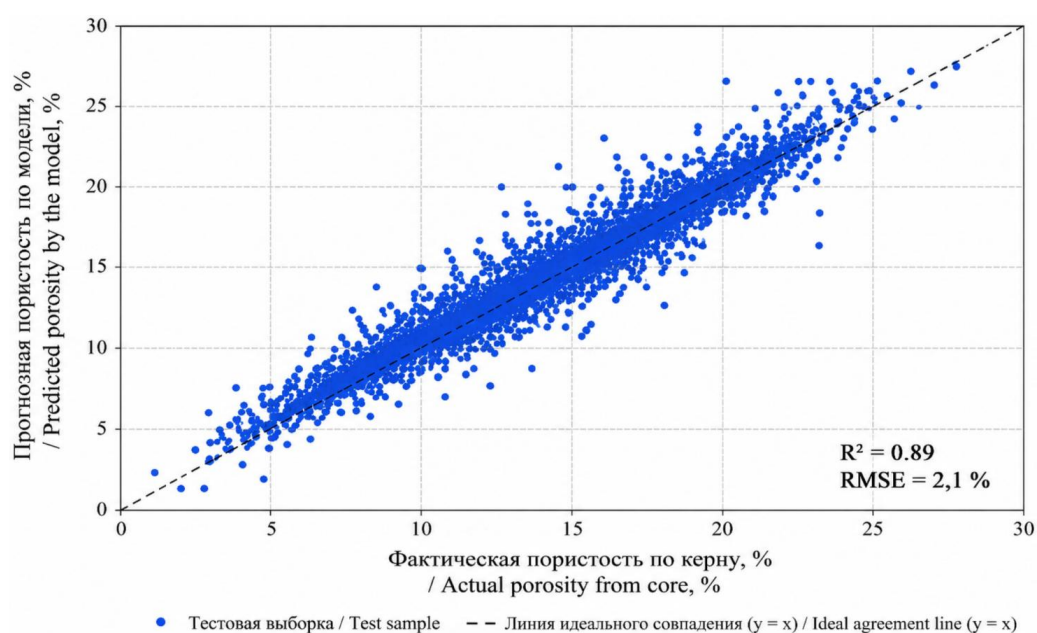


Рис. 1. Сравнение фактических и прогнозных значений пористости пород-коллекторов, полученных по данным нейросетевой модели /

Fig. 1. Comparison of actual and predicted values of reservoir rock porosity obtained using neural network model data

При анализе распределения ошибок было установлено, что наибольшие отклонения прогноза возникают в интервалах с резкой литологической изменчивостью. Особенно заметно это проявлялось на границах песчаников и алевролитов, а также в зонах повышенной глинистости. В подобных интервалах традиционные методы интерпретации также демонстрируют недостаточную устойчивость, однако нейросетевая модель все же обеспечивала более плавное изменение прогнозируемых параметров. Следует отметить, что при наличии достаточного количества обучающих данных качество прогноза в подобных сложных интервалах постепенно возрастало.

Отдельный интерес представляет влияние состава обучающей выборки на итоговые результаты расчета. Было установлено, что использование данных только по одному месторождению обеспечивает достаточно высокую точность в пределах данного объекта, однако при переносе модели на соседние площади точность существенно снижается. Это связано с изменением литологического состава пород, особенностями минерализации пластовых вод и различием геофизических характеристик коллекторов. При объединении данных нескольких месторождений нейросетевая модель становилась более универсальной, однако одновременно возрастал общий уровень ошибки. Вероятно, это связано с усложнением внутренней структуры взаимосвязей между параметрами ГИС и фильтрационно-емкостными характеристиками пород.

В ходе работы проводилось сравнение различных алгоритмов машинного обучения. Помимо многослойной нейронной сети исследовались модели случайного леса, градиентного бустинга и метода опорных векторов (табл. 2). Установлено, что на небольших выборках градиентный бустинг в ряде случаев демонстрировал результаты, сопоставимые с нейронной сетью. Однако при увеличении объема данных нейросетевая архитектура обеспечивала более устойчивую сходимость и меньшую ошибку прогноза. Метод случайного леса показывал хорошие результаты при определении литологических границ, но хуже справлялся с прогнозом проницаемости. Метод опорных векторов оказался чувствителен к выбору параметров ядра и требовал значительного времени вычислений при обработке больших массивов данных.

Таблица 2 / Table 2

Сравнение точности различных алгоритмов машинного обучения при прогнозе пористости / Comparison of the accuracy of different machine learning algorithms in predicting porosity

Модель / Model	RMSE, %	MAE, %	R ²	Время обучения, мин. / Training time, min.
Линейная регрессия / Linear regression	5,8	4,6	0,54	0,3
Метод опорных векторов / Support Vector Machine (SVM)	3,7	2,9	0,73	18
Случайный лес / Random Forest	3,1	2,4	0,79	11
Градиентный бустинг / Gradient Boosting	2,6	2,1	0,84	15
Нейросетевая модель MLP / MLP Neural Network Model	2,1	1,8	0,89	24

Достаточно важным результатом исследования стало выявление устойчивой зависимости между качеством прогноза и степенью предварительной обработки коротажных кривых. Без фильтрации шумов и удаления аномальных значений ошибка модели возрастала практически в два раза. Особенно негативно влияли интервалы кавернозности ствола скважины и участки с нарушением условий регистрации геофизических сигналов. После коррекции подобных участков качество прогноза существенно улучшалось. Это показывает, что даже наиболее современные методы машинного обучения не позволяют полностью компенсировать низкое качество исходных данных.

При анализе динамики обучения было установлено, что наиболее интенсивное снижение ошибки происходило в первые 50–70 эпох. Далее процесс стабилизировался и изменение функции потерь становилось минимальным. При увеличении числа

эпох свыше 250 наблюдалось постепенное ухудшение качества прогноза на тестовой выборке, что также свидетельствует о начале переобучения сети. В связи с этим оптимальным режимом обучения для используемой архитектуры можно считать диапазон 120–180 эпох при размере обучающего пакета 256 наблюдений.

Полученные результаты показывают, что применение нейросетевых алгоритмов позволяет значительно повысить достоверность прогноза коллекторских свойств по сравнению с традиционными методами интерпретации геофизических исследований скважин. Особенно это важно для трудноизученных объектов и месторождений с высокой литологической неоднородностью. Следует отметить, что нейросетевые модели обладают способностью учитывать сложные нелинейные взаимосвязи между параметрами ГИС, которые практически невозможно описать стандартными аналитическими зависимостями.

Вместе с тем результаты исследования показывают, что использование методов машинного обучения не может полностью заменить классический геолого-геофизический анализ. Эффективность нейросетевых алгоритмов напрямую зависит от качества исходных данных, объема обучающей выборки и корректности предварительной обработки информации. Кроме того, нейросетевые модели во многих случаях представляют собой так называемый «черный ящик», что затрудняет физическую интерпретацию отдельных этапов расчета. В связи с этим наиболее перспективным направлением представляется совместное использование традиционных петрофизических подходов и современных методов искусственного интеллекта.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности оперативного прогноза фильтрационно-емкостных характеристик продуктивных пластов непосредственно по данным геофизических исследований скважин без необходимости длительного ожидания результатов лабораторных исследований керна. Это особенно важно при оперативном сопровождении бурения и оценке перспектив нефтегазоносности новых объектов. Использование подобных моделей позволяет сократить неопределенность при подсчете запасов, повысить точность построения геологических моделей и улучшить качество прогноза продуктивности пластов. Полученные результаты могут быть использованы при создании цифровых систем сопровождения геологоразведочных работ и интеллектуальных комплексов интерпретации геофизической информации.

Выводы

В результате проведенных исследований было установлено, что применение нейросетевых алгоритмов для интерпретации геофизических исследований скважин позволяет существенно повысить точность прогноза коллекторских свойств нефтегазоносных пород по сравнению с традиционными методами обработки данных. Показано, что многослойные нейронные сети способны эффективно выявлять сложные нелинейные взаимосвязи между параметрами ГИС и фильтрационно-емкостными характеристиками пород, которые недостаточно хорошо описываются стандартными эмпирическими зависимостями.

В ходе работы было определено, что наибольшее влияние на качество прогноза оказывают данные акустического, нейтронного и плотностного каротажа. Использование комплексной обработки нескольких геофизических параметров позволило получить устойчивый прогноз открытой пористости даже в условиях сложного литологического строения разреза. Коэффициент детерминации для нейросетевой модели достигал значений 0,86–0,91, а среднеквадратичная ошибка прогноза пористости составила порядка 1,8–2,4 %, что заметно ниже результатов, полученных при использовании классических петрофизических методов.

Установлено, что качество работы нейросетевой модели в значительной степени зависит от предварительной подготовки данных. Наличие шумов, аномальных значений и пропусков в материалах ГИС приводит к заметному ухудшению устойчивости обучения и увеличению ошибки прогноза. Применение процедур фильтрации, нормализации и удаления выбросов позволило существенно повысить стабильность обучения нейронной сети и снизить вероятность переобучения модели.

Проведенное сравнение различных алгоритмов машинного обучения показало, что нейросетевые модели обеспечивают наиболее высокую точность при обработке больших массивов геофизической информации. При этом методы градиентного бустинга и случайного леса также демонстрируют достаточно хорошие результаты и могут эффективно использоваться при ограниченном объеме обучающей выборки. Отмечено, что использование только данных одного месторождения снижает универсальность модели при переносе на другие геологические объекты.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения методов искусственного интеллекта для решения задач нефтегазовой геофизики и построения цифровых моделей месторождений. Использование нейросетевых алгоритмов позволяет повысить достоверность оценки коллекторских свойств, сократить неопределенность при подсчете запасов и повысить эффективность интерпретации геофизических исследований скважин. Практическая значимость работы заключается в возможности оперативного прогноза параметров продуктивных пластов непосредственно в процессе геологоразведочных работ и сопровождения бурения.

В дальнейшем представляется целесообразным проведение исследований, связанных с использованием более сложных архитектур глубокого обучения, а также интеграцией геофизических, геологических и сейсмических данных в единые интеллектуальные системы интерпретации нефтегазовых объектов.

Литература

1. Alagoz E., Dundar E.C., Tangirala S., Oskay M.M., Canbaz C.H., Saputelli L., Sari M.M., Tutun S., Temizel C. AI applications in unconventional. In: *Artificial Intelligence in the Energy Industry: Theory, Case Studies, and Applications*. CRC Press, 2026. – pp. 478–557. DOI: 10.1201/9781003617327-8.
2. Anifowose F., Badawood S. Improved reservoir rock porosity prediction from advanced mud gas data // *International Petroleum Technology Conference (IPTC 2024)*. – 2024. DOI: 10.2523/IPTC-23110-EA.
3. Dang T., Xu T., Liu S., Yan S., Wang J., Wang R. Gas-bearing prediction of tight clastic rock reservoirs based on random forest-modern temporal convolutional network // *Geophysics*. – 2025. – Vol. 90. No. 2. – pp. M1–M14. DOI: 10.1190/geo2024-0352.1.
4. Fan H., Zhao X., Liang X., Miao Q., Jin Y., Wang X. Semi-supervised learning-based petrophysical facies division and “sweet spot” identification of low-permeability sandstone reservoir // *Frontiers in Earth Science*. – 2022. – Vol. 9. – Art. No. 805342. DOI: 10.3389/feart.2021.805342.
5. Fan L.-Y., Wu J.-P., Guo K., Sheng S.-B., Cheng X.-D., Tai U.-M., Li Y., Ran H.-J., Li X.-N., Li Y.-G. Fine prediction and characterization of lithology-reservoir-fluid in Southeastern Margin slope belt of the Pre-Caspian Basin. In: *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*. Springer, 2024. – pp. 134–152. DOI: 10.1007/978-981-97-0468-2_12.
6. Gao S., Xu M., Zhao L., Chen Y., Geng J. Seismic predictions of fluids via supervised deep learning: Incorporating various class-rebalance strategies // *Geophysics*. – 2023. – Vol. 88. No 4. – pp. M185–M200. DOI: 10.1190/geo2022-0363.1.
7. Ghiasi-Freez J., Kadkhodaie-Ilkhchi A., Ziaei M. Improving the accuracy of flow units prediction through two committee machine models: An example from the South Pars Gas Field, Persian Gulf Basin, Iran // *Computers and Geosciences*. – 2012. – Vol. 46. – pp. 10–23. DOI: 10.1016/j.cageo.2012.04.006.

8. Guliyev H.H., Aghayev K.B., Hasanova G.H. Determining the elastic moduli of the third order for sedimentary rocks based on well-logging data // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2016. – Vol. 52. No. 6. – pp. 836–843. DOI: 10.1134/S1069351316050062.
9. Ismail A., Ewida H.F., Nazeri S., Al-Ibiary M.G., Zollo A. Gas channels and chimneys prediction using artificial neural networks and multi-seismic attributes, offshore West Nile Delta, Egypt // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 208. – Art. No. 109349. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109349.
10. Khatibi S., Aghajanpour A. Machine learning: A useful tool in geomechanical studies, a case study from an offshore gas field // *Energies*. – 2020. – Vol. 13. No. 14. – Art. No. 3528. DOI: 10.3390/en13143528.
11. Kurtyi V.O., Verpakhovska O.O. Use of neural networks for studying nontraditional hydrocarbon reservoirs (an example of Visean black shales of the Dnipro-Donets Basin) // *Geophysical Journal*. – 2025. – Vol. 47. No. 6. – pp. 26–38. DOI: 10.24028/gj.v47i6.341701.
12. Lashin A., El Din S.S. Reservoir parameters determination using artificial neural networks: Ras Fanar field, Gulf of Suez, Egypt // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2013. – Vol. 6. No. 8. – pp. 2789–2806. DOI: 10.1007/s12517-012-0541-6.
13. Lehman L.V., Jackson K., Noblett B. Big Data Yields Completion optimization: using drilling data to optimize completion efficiency in a low permeability formation // *SPE Annual Technical Conference Proceedings*. – 2016. DOI: 10.2118/181273-MS.
14. Lis-Sledziona A., Kaczmarczyk-Kuszpit W. A technique of hydrocarbon potential evaluation in low resistivity gas-saturated mudstone horizons in miocene deposits, South Poland // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. No. 5. – Art. No. 1890. DOI: 10.3390/en15051890.
15. Luo G., An X., Yao W., Zou Y. Application status and development trends of artificial intelligence in logging interpretation for unconventional oil and gas reservoirs // *Petroleum Science Bulletin*. – 2025. – Vol. 10. No. 5. – pp. 908–925. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.022.
16. Mohamed I.A., El-Mowafy H.Z., Kamel D., Heikal M. Prestack seismic inversion versus neural-network analysis: A case study in the Scarab field offshore Nile Delta, Egypt // *Leading Edge*. – 2014. – Vol. 33. No. 5. – pp. 498–506. DOI: 10.1190/tle33050498.1.
17. Niu Y., Zhao J., Zhong J., Wang M., Xu Z., Cheng M. Identification of the bioturbated carbonate reservoir and their porosity prediction based on conventional well logging data using artificial neural networks // *Geological Review*. – 2021. – Vol. 67. No. 6. – pp. 1898–1909. DOI: 10.16509/j.georeview.2021.08.061.
18. Saneifar M., Heidari Z. Permeability assessment in carbonate formations using conventional well logs required for prediction of acid fracture conductivity // In: *Conference: SPWLA 54th Annual Logging Symposium*. 2013.
19. Wang J., Zhou Y., Huang M. Extracting rock information based on integrated convolutional neural network and image processing technology // In: *42nd Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2021)*. – 2021.
20. Wang Z., Jin S.-T., Li Q., Lin Y.-P. Recognition of subsalt carbonate reefs and shoals in the central block of the Pre-Caspian Basin. In: *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*. Springer, 2022. – pp. 2988–2996. DOI: 10.1007/978-981-19-2149-0_278.
21. Zhang Y., Yang H. Direct inversion of 3D seismic reservoir parameters based on dual learning networks // *Petroleum Science*. – 2025. – Vol. 22. No. 10. – pp. 4037–4051. DOI: 10.1016/j.petsci.2025.05.027.

References

1. Alagoz E., Dundar E.C., Tangirala S., Oskay M.M., Canbaz C.H., Saputelli L., Sari M.M., Tutun S., Temizel C. AI applications in unconventional. In: *Artificial Intelligence in the Energy Industry: Theory, Case Studies, and Applications*. CRC Press. 2026. pp. 478–557. DOI: 10.1201/9781003617327-8.
2. Anifowose F., Badawood S. Improved reservoir rock porosity prediction from advanced mud gas data. *International Petroleum Technology Conference (IPTC 2024)*. 2024. DOI: 10.2523/IPTC-23110-EA.

3. Dang T., Xu T., Liu S., Yan S., Wang J., Wang R. Gas-bearing prediction of tight clastic rock reservoirs based on random forest-modern temporal convolutional network. *Geophysics*. 2025. Vol. 90. No. 2. pp. M1–M14. DOI: 10.1190/geo2024-0352.1.
4. Fan H., Zhao X., Liang X., Miao Q., Jin Y., Wang X. Semi-supervised learning–based petrophysical facies division and “sweet spot” identification of low-permeability sandstone reservoir. *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 9. Art. No. 805342. DOI: 10.3389/feart.2021.805342.
5. Fan L.-Y., Wu J.-P., Guo K., Sheng S.-B., Cheng X.-D., Tai U.-M., Li Y., Ran H.-J., Li X.-N., Li Y.-G. Fine prediction and characterization of lithology-reservoir-fluid in Southeastern Margin slope belt of the Pre-Caspian Basin. In: *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*. Springer. 2024. pp. 134–152. DOI: 10.1007/978-981-97-0468-2_12.
6. Gao S., Xu M., Zhao L., Chen Y., Geng J. Seismic predictions of fluids via supervised deep learning: Incorporating various class-rebalance strategies. *Geophysics*. 2023. Vol. 88. No 4. pp. M185–M200. DOI: 10.1190/geo2022-0363.1.
7. Ghiassi-Freez J., Kadkhodaie-Ilkhchi A., Ziaii M. Improving the accuracy of flow units prediction through two committee machine models: An example from the South Pars Gas Field, Persian Gulf Basin, Iran. *Computers and Geosciences*. 2012. Vol. 46. pp. 10–23. DOI: 10.1016/j.cageo.2012.04.006.
8. Guliyev H.H., Aghayev K.B., Hasanova G.H. Determining the elastic moduli of the third order for sedimentary rocks based on well-logging data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2016. Vol. 52. No. 6. pp. 836–843. DOI: 10.1134/S1069351316050062.
9. Ismail A., Ewida H.F., Nazeri S., Al-Ibiary M.G., Zollo A. Gas channels and chimneys prediction using artificial neural networks and multi-seismic attributes, offshore West Nile Delta, Egypt. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. Vol. 208. Art. No. 109349. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109349.
10. Khatibi S., Aghajanpour A. Machine learning: A useful tool in geomechanical studies, a case study from an offshore gas field. *Energies*. 2020. Vol. 13. No. 14. Art. No. 3528. DOI: 10.3390/en13143528.
11. Kurtyi V.O., Verpakhovska O.O. Use of neural networks for studying nontraditional hydrocarbon reservoirs (an example of Visean black shales of the Dnipro-Donets Basin). *Geophysical Journal*. 2025. Vol. 47. No. 6. pp. 26–38. DOI: 10.24028/gj.v47i6.341701.
12. Lashin A., El Din S.S. Reservoir parameters determination using artificial neural networks: Ras Fanar field, Gulf of Suez, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*. 2013. Vol. 6. No. 8. pp. 2789–2806. DOI: 10.1007/s12517-012-0541-6.
13. Lehman L.V., Jackson K., Noblett B. Big Data Yields Completion optimization: using drilling data to optimize completion efficiency in a low permeability formation. *SPE Annual Technical Conference Proceedings*. 2016. DOI: 10.2118/181273-MS.
14. Lis-Sledziona A., Kaczmarczyk-Kuszpit W. A technique of hydrocarbon potential evaluation in low resistivity gas-saturated mudstone horizons in miocene deposits, South Poland. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 5. Art. No. 1890. DOI: 10.3390/en15051890.
15. Luo G., An X., Yao W., Zou Y. Application status and development trends of artificial intelligence in logging interpretation for unconventional oil and gas reservoirs. *Petroleum Science Bulletin*. 2025. Vol. 10. No. 5. pp. 908–925. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.022.
16. Mohamed I.A., El-Mowafy H.Z., Kamel D., Heikal M. Prestack seismic inversion versus neural-network analysis: A case study in the Scarab field offshore Nile Delta, Egypt. *Leading Edge*. 2014. Vol. 33. No. 5. pp. 498–506. DOI: 10.1190/tle33050498.1.
17. Niu Y., Zhao J., Zhong J., Wang M., Xu Z., Cheng M. Identification of the bioturbated carbonate reservoir and their porosity prediction based on conventional well logging data using artificial neural networks. *Geological Review*. 2021. Vol. 67. No. 6. pp. 1898–1909. DOI: 10.16509/j.georeview.2021.08.061.
18. Saneifar M., Heidari Z. Permeability assessment in carbonate formations using conventional well logs required for prediction of acid fracture conductivity. In: *Conference: SPWLA 54th Annual Logging Symposium*. 2013.

19. Wang J., Zhou Y., Huang M. Extracting rock information based on integrated convolutional neural network and image processing technology. In: 42nd Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2021). 2021.

20. Wang Z., Jin S.-T., Li Q., Lin Y.-P. Recognition of subsalt carbonate reefs and shoals in the central block of the Pre-Caspian Basin. In: Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Springer. 2022. pp. 2988–2996. DOI: 10.1007/978-981-19-2149-0_278.

21. Zhang Y., Yang H. Direct inversion of 3D seismic reservoir parameters based on dual learning networks. *Petroleum Science*. 2025. Vol. 22. No. 10. pp. 4037–4051. DOI: 10.1016/j.petsci.2025.05.027.

Юбилей Василия Ивановича Попкова



23 мая 2026 года исполнилось 75 лет со дня рождения известного российского ученого, доктора геолого-минералогических наук, профессора кафедры геологии и геофизики Кубанского государственного университета (КубГУ) Василия Ивановича Попкова, активно работающего в области геотектоники и нефтегазовой геологии. Родился 23 мая 1951 г. в с. Ново-Михайловка Георгиевского р-на Ставропольского края. В 1974 г. окончил геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Получил распределение в трест геофизики на п-ов Мангышлак (г. Шевченко, ныне – Актау). Через полгода был приглашен на работу в научно-исследовательский и проектный институт КазНИПИнефть. Через 4 года после окончания МГУ поступил в заочную аспирантуру при МИНХиГП им. Губкина, которую окончил до-

срочно, успешно защитив кандидатскую диссертацию в 1979 г., а еще через 10 лет (1990 г.) – докторскую в МГУ, став первым доктором наук на Мангышлаке.

Научные исследования В.И. Попкова направлены на выяснение закономерностей формирования и размещения скоплений нефти и газа в земной коре, повышение достоверности прогноза нефтегазоносности недр и эффективности геологоразведочных работ. Им впервые в стране разработаны и введены в научный оборот новые знания о геодинамической обстановке формирования внутриплитных нефтегазоносных осадочных бассейнов, обоснована определяющая роль тангенциального стресса в процессах генерации, миграции и аккумуляции нефти и газа в земной коре. На основе установленных фундаментальных положений внутриплитной тектоники разработана оригинальная структурно-геодинамическая модель формирования нефтегазоносных осадочных бассейнов Черноморско-Каспийского региона, активно используемая при поисках нефтегазовых месторождений также и в Республике Казахстан.

В.И. Попков имеет большой опыт решения задач прикладной геологии. Ему принадлежит первый прогноз обнаружения промышленных скоплений УВ в фундаменте Мангышлака с обоснованием поискового бурения на площади Оймаша и местоположения скважин, подтвержденный в дальнейшем открытием (впервые в б. СССР) месторождения нефти в гранитном массиве фундамента.

В.И. Попковым разработана оригинальная модель залежи нефти в гранитоидном массиве, введены в геологию резервуаров УВ такие понятия, как «явления термусадки», «тектоно-кесонный эффект» и др., было зарегистрировано изобретение нового метода поиска месторождений нефти и газа.

В.И. Попковым было обосновано создание Песчаномысского опорно-методического полигона с составлением программы исследований нефтегазоносности фунда-

мента с последующим кураторством и анализом результатов опытно-методических геолого-геофизических работ. Внедрение его научных разработок способствовало также открытию ряда месторождений нефти и газа: Алатюбе, Суюкты-море, Восточная Узень, и в их числе такого супергигантского по запасам месторождения, как Кашаган (Северный Каспий).



В.И. Попков внес большой вклад в создание геологической научной школы на юге России. В 2003 г. в стенах КубГУ им была организована кафедра региональной и морской геологии, в 2004 г. им создан геологический факультет, который он возглавлял до 2018 г. Университет стал единственным учебным заведением в регионе, где ведется подготовка геологов-нефтяников, геофизиков, гидрогеологов и инженеров-геологов. Он академик РАЕН, почетный работник высшего профессионального образования РФ, эксперт РНФ, РФФИ, член Федерального реестра экспертов научно-технической сферы РФ, зам. главного редактора научных журналов «Геология, география и глобальная энергия», «Геология. Известия отделения наук о земле и природных ресурсов», член редколлегии журнала «Геотектоника», член президиума УМО по геологии.

За создание новых технологий прогноза нефтегазоносности недр и подготовку кадров высшей квалификации В.И. Попков в 2021 г. был удостоен почётного звания «Заслуженный деятель науки Кубани».

Редакция журнала «Геология и геофизика Юга России» от всего сердца поздравляет профессора Василия Ивановича со знаменательным днем – 75-летним юбилеем – и желает здоровья, долгих лет жизни, успешности в делах и тепла близких.

Главный редактор

В.Б. Заалишвили

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
(№ 2. 2026 г. Том 16)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 26.06.2026 г. Дата фактического выхода 30.06.2026 г.

Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.

Гарнитура «Times». Усл. печ. лист 32,7.

Тираж 100 экз. Заказ №89.

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