

ISSN 2221-3198

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 3 / 2025



ISSN 2221-3198
e-ISSN 2686-7486

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

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

**GEOLOGY AND
GEOPHYSICS
OF RUSSIAN SOUTH**

**Том 15
№ 3 / 2025**

Владикавказ 2025

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

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

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

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

Республиканский Центр сейсмологической службы при НАНА, Азербайджан

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ответственный секретарь

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

Выпускающий редактор

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

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

Журнал включен в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus

Журнал издается с 2011 года.

Периодичность издания – 4 номера в год

Учредитель:

ВНЦ РАН

Адрес учредителя:

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

Тел.: 8(8672)726788

e-mail: info@vncran.ru

http://vncran.ru

Издатель:

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук

Адрес издателя и редакции:

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

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

e-mail: southgeo@mail.ru

http://geosouth.ru

ISSN 2221-3198

e-ISSN 2686-7486

Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 29119

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

© Геофизический институт ВНЦ РАН, 2025

Фото на обложке – Осень (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, 2025

Cover photo – Autumn (K.S. Kharebov)

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

Свалова В.Б.

- Геодинамика, геотермия и сейсмичность Кавказско-Анатолийско-Аравийского региона и землетрясение
в Мраморном море (Турция) 23 апреля 2025 года 8

Yetirmishli G.J., Kazimova S.E.

- Ambient seismic tomography of the lithosphere of Azerbaijan region 24

ГЕОФИЗИКА

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) 37

Гасанов А.Б., Аббасов Э.Ю., Мамедова Д.Н.

- Стабильность флюидопроницаемости вулканогенных коллекторов при деформации 53

Клюев Р.В., Бригида В.С.

- Совершенствование мониторинга оползневых процессов горных склонов при наличии транспортной
инфраструктуры 66

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

- Аномальное магнитное поле и сейсмичность Большого Кавказа и Восточного Предкавказья 79

Чернов Ю.К.

- О параметрах сильных движений грунта, очагах землетрясений и иерархии структур
геологической среды 92

Karapetyan J.K., Hovhannisyan L.Kh., Karapetyan R.K.

- Simulated of earthquake wave compatible with design spectrum 110

Mammadli T.Ya.

- On the seismicity of the Karabakh and East Zangezur territories of Azerbaijan 128

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Давыденко Д.Б., Парада С.Г.

- Локализация золотоносных минерализаций по космическим снимкам 136

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Долгих В.П.

- Оценка применимости моделей машинного обучения для прогноза гидроэкологического состояния
малых рек 148

Забураева Х.Ш., Забураев Ч.Ш., Седиева М.Б., Шаипова А.А.

- Оптимизация рекреационного природопользования на Северо-Восточном Кавказе 162

Решетняк О.С., Комаров Р.С.

- Анализ вероятности метаморфизации ионного состава речных вод в бассейне Кубани 174

Толоконникова З.А.

- Объекты геологического наследия на Черноморском побережье Краснодарского края 187

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГЕОМЕХАНИКА

Голик В.И.

- Итерационное моделирование технологий разработки месторождений Садонской
геологической провинции 199

Панфилова Т.А., Кукарцев В.В., Худякова Е.В., Степанцевич М.Н., Красовская Л.В.

- Геофизическая оценка эффективности цеолитсодержащих барьеров для защиты вод от загрязнения
на горнопромышленных территориях..... 211

ГЕОИНФОРМАТИКА

Погорелов А.В., Лагута А.А.

- Техногенное разрушение речных систем Восточного Приазовья
(на примере рек Понура и Кирпили)..... 226

Эзирбаев Т.Б.

- Нижнемеловая залежь Старогрозненского нефтегазового месторождения как объект
геологического моделирования 239

CONTENTS

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

Svalova V.B.

- Geodynamics, geothermics and seismicity of the Caucasus-Anatolian-Arabian region and the earthquake in the Sea of Marmara (Turkey) on 23 April 20258

Yetirmishli G.J., Kazimova S.E.

- Ambient seismic tomography of the lithosphere of Azerbaijan region24

GEOPHYSICS

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)37

Hasanov A.B., Abbasov E.Yu., Mamedova D.N.

- Stability of fluid permeability of volcanogenic reservoirs under deformation53

Klyuev R.V., Brigida V.S.

- Improving monitoring of landslide processes on mountain slopes in the presence of transport infrastructure66

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

- Anomalous magnetic field and seismicity of the Greater Caucasus and Eastern Ciscaucasia79

Chernov Yu.K.

- About the parameters of strong ground motions, earthquake foci and hierarchies of the geological environment structure92

Karapetyan J.K., Hovhannisyan L.Kh., Karapetyan R.K.

- Simulated of earthquake wave compatible with design spectrum110

Mammadli T.Ya.

- On the seismicity of the Karabakh and East Zangezur territories of Azerbaijan128

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY

Davydenko D.B., Parada S.G.

- Localization of gold-bearing mineralizations from satellite images136

GEOECOLOGY

Dolgikh V.P.

- Assessment of the applicability of machine learning models for forecasting the hydroecological state of small rivers148

Zaburaeva Kh.Sh., Zaburaev Ch.Sh., Sedieva M.B., Shaipova A.A.

- Optimization of recreational nature management in the North-Eastern Caucasus162

Reshetnyak O.S., Komarov R.S.

- Analysis of the probability of metamorphism of the ionic composition of river waters in the Kuban basin174

Tolokonnikova Z.A.

Geological heritage sites on the Black Sea coast of Krasnodar Krai.....187

GEOTECHNOLOGY. GEOMECHANICS

Golik V.I.

Iterative modeling of field development technologies in the Sadon geological province199

Panfilova T.A., Kukartsev V.V., Khudyakova E.V., Stepantsevich M.N., Krasovskaya L.V.Geophysical assessment of the efficiency of zeolite-containing barriers for water protection
in mining areas211

GEOINFORMATICS

Pogorelov A.V., Laguta A.A.

Technogenic destruction of the river systems of the Eastern Azov region (Ponura and Kirpili rivers).....226

Ezirbaev T.B.

The Lower Cretaceous reservoir of the Starogroznenkoye oil and gas field as an object of geological modeling239

УДК 550.34.013.4, 551.24, 551.2.03

DOI: 10.46698/VNC.2025.78.36.001

Оригинальная статья

Геодинамика, геотермия и сейсмичность Кавказско-Анатолийско-Аравийского региона и землетрясение в Мраморном море (Турция) 23 апреля 2025 года

В.Б. Свалова 

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Россия, 101000,
г. Москва, Уланский пер., 13, стр. 2, e-mail: v-svalova@mail.ru;
Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а

Статья поступила: 30.06.2025, доработана: 10.09.2025, принята к публикации: 12.09.2025

Резюме: Актуальность работы. 23 апреля 2025 года в Мраморном море произошло землетрясение магнитудой М 6,2. Каждое новое сильное землетрясение дает дополнительную информацию о сейсмичности в регионе и позволяет уточнить прогноз и предупреждение последующих возможных разрушительных событий. Распространение сильных землетрясений вдоль Северо-Анатолийского разлома с востока на запад, имеющее определенную закономерность, делает землетрясение в Мраморном море важным звеном в этой цепочке и дает новый материал для анализа сейсмичности в окрестности Стамбула. **Целью исследования** является анализ и выявление соотношения и взаимосвязи землетрясения 2025 года в Мраморном море с сильными землетрясениями вдоль Северо-Анатолийского разлома 1939–1999 годов, а также с более ранними историческими землетрясениями в регионе Стамбула 1509 и 1766 годов. **Методами исследования** являются построение геодинамических и геотермических моделей глубинного строения регионов стихийных бедствий и катастроф и сравнительный анализ имеющихся геолого-геофизических данных региона активных континентальных окраин и сейсмогенерирующих разломов. **Результаты исследования.** Реализуются два механизма достижения предела прочности пород на глубине для формирования очага землетрясения. Это активизация сейсмогенерирующих разломов вследствие горизонтального движения литосферных плит и вертикальный подъем вещества в виде мантийных диапиров вследствие гравитационной неустойчивости. Сильные землетрясения, распространяющиеся вдоль Северо-Анатолийского разлома с востока на запад, преодолели окрестности Стамбула и продвигаются дальше на запад к Эгейскому морю, свидетельством чего может служить землетрясение 2025 года западнее Стамбула, что может говорить о снижении сейсмического риска для Стамбула в ближайшее время в плане горизонтальных движений по разлому. В то же время опасность от возможного сильного землетрясения по типу исторических землетрясений с периодом 250 лет (1509 г., 1766 г.) остается высокой. Такое землетрясение в окрестности Стамбула может произойти в течение ближайших нескольких лет.

Ключевые слова: стихийные бедствия, землетрясения, геодинамика, сейсмичность, геотермия, Кавказ, Турция, моделирование, сейсмотомография, прогноз.

Для цитирования: Свалова В.Б. Геодинамика, геотермия и сейсмичность Кавказско-Анатолийско-Аравийского региона и землетрясение в Мраморном море (Турция) 23 апреля 2025 года. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 8–23. DOI: 10.46698/VNC.2025.78.36.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.78.36.001

Original paper

Geodynamics, geothermics and seismicity of the Caucasus-Anatolian-Arabian region and the earthquake in the Sea of Marmara (Turkey) on 23 April 2025

V.B. Svalova 

Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
13 Ulansky lane, 2 p., Moscow 101000, Russian Federation,
e-mail: v-svalova@mail.ru;

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

Received: 30.06.2025, revised: 10.09.2025, accepted: 12.09.2025

Abstract: Relevance. On 23 April 2025, an earthquake with a magnitude of M 6.2 occurred in the Sea of Marmara. Each new strong earthquake provides additional information about seismicity in the region and makes it possible to refine the forecast and prevention of subsequent possible destructive events. The propagation of strong earthquakes along the North Anatolian Fault from east to west, which has a certain pattern, makes the earthquake in the Sea of Marmara an important link in this chain and provides new material for the analysis of seismicity in the vicinity of Istanbul. **Aim of the study is** to analyze and identify the relationship and interrelationship of the 2025 Marmara earthquake with the strong earthquakes along the North Anatolian Fault of 1939-1999, as well as with the earlier historical earthquakes of 1509 and 1766 in the Istanbul region. **Research methods** are the construction of geodynamic and geothermal models of the deep structure of regions of natural disasters and catastrophes and a comparative analysis of available geological and geophysical data of the region of active continental margins and seismogenic faults. **Results.** There are two mechanisms for achieving the ultimate strength of rocks at depth to form an earthquake source. These are the activation of seismogenic faults due to the horizontal movement of lithosphere plates and the vertical rise of matter in the form of mantle diapirs due to gravitational instability. Strong earthquakes propagating along the North Anatolian Fault from east to west have passed the vicinity of Istanbul and are moving further west towards the Aegean Sea, as may be witnessed by the earthquake of 2025 west of Istanbul, which may indicate a decrease in the seismic risk for Istanbul in the near future in terms of horizontal movements along the fault. At the same time, the hazard from a possible strong earthquake of the type of historical earthquakes with a period of 250 years (1509, 1766) remains high. Such an earthquake in the vicinity of Istanbul may occur within the next few years.

Keywords: natural disasters, earthquakes, geodynamics, seismicity, geothermy, Caucasus, Turkey, modeling, seismic tomography, forecast.

For citation: Svalova V.B. Geodynamics, geothermics and seismicity of the Caucasus-Anatolian-Arabian region and the earthquake in the Sea of Marmara (Turkey) on 23 April 2025. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 8-23. DOI: 10.46698/VNC.2025.78.36.001

Введение

Сейсмичность Турции

23 апреля 2025 года в 12:49:10 по местному времени (UTC+3:00) в Мраморном море произошло землетрясение магнитудой M 6,2. Его эпицентр находился в 21 км

к юго-востоку от района Мармара-Эреглиси, провинция Текирдаг, Турция, в 73 км к юго-западу от Стамбула, с координатами 40°49'58" с. ш. 28°13'36" в. д.

По данным отчета Стамбульского технического университета (İTÜ), землетрясение длилось 13 секунд и вызвало 291 афтершок. Смещение плит составило всего 30 см – значительно меньше ожидаемых 3,7 метра. Афтершоки распределились вдоль полосы 40 × 12 км, достигая глубины до 30 км.

Максимальная оценка интенсивности по модифицированной шкале Меркалли достигла VII (очень сильное). По разным источникам, глубина залегания очага составила от 10 до 16,9 км. Этому толчку предшествовало землетрясение магнитудой 3,9, которое было зафиксировано в 12:13 в Мраморном море, недалеко от города Силиври.

Вслед за ним последовали еще три толчка, включая основной магнитудой М 6,2. Еще два землетрясения произошли в районе Бююкчекмедже (41°01'12"N 28°34'39"E) с интервалом в 11 минут. Их магнитуда составила 4,4 и 4,9 соответственно.

По данным Геологической службы США, около 188 000 человек подверглись воздействию сотрясений интенсивности VII. Сотрясения интенсивности VI (сильные) ощутили около 2,28 миллиона человек, в основном в западных районах провинции Стамбул. Сотрясения интенсивности IV (умеренные) были зарегистрированы в центральных частях городов Стамбул и Бурса, а также в Эвросе (Греция) и в городах Бургас и Ямбол (Болгария). Сообщения о толчках поступили из таких удалённых районов, как Газиантеп, Бухарест (Румыния) и София (Болгария). По меньшей мере, 359 человек получили травмы в результате массовой паники, когда прыгали с высоты, в том числе 236 человек в Стамбуле. В районе Фатих обрушилось заброшенное трёхэтажное здание. Были зафиксированы повреждения нескольких зданий и перебои с интернетом в отдельных районах Стамбула. В Мраморноморском регионе было развёрнуто, по меньшей мере, 3597 спасателей, в том числе 1443 в Стамбуле, а также 250 единиц техники.

Город Стамбул с населением около 16 миллионов человек, когда-то столица Византийской и Османской империй, расположен в опасной близости от Северо-Анатолийского разлома, который проходит в 20 километрах (12,4 мили) к югу от Стамбула через Мраморное море. Т.к. территория Турции почти полностью расположена на линиях сейсмических разломов, каждый год там происходят тысячи землетрясений различной магнитуды.

В 2024 году Управление по чрезвычайным ситуациям и стихийным бедствиям Турции зарегистрировало более 30 400 подземных толчков. Годом с наибольшим количеством зафиксированных землетрясений стал 2023 год, когда было зарегистрировано более 74 тысяч подземных толчков.

Землетрясение магнитудой 7,8 произошло на юго-востоке Турции 6 февраля 2023 года в 04:17 по местному времени. [Svalova, 2023; Вольфман, Колесникова, 2023; Геодакян и др., 2023, 2024; Свалова, Заалишвили, 2024б]. Эпицентр находился в 37 км к западу-северо-западу от Газиантепа. По данным Геологической службы США, гипоцентр землетрясения находился на глубине 10,0 км. За землетрясением последовало землетрясение магнитудой 7,7 в 13:24. Это землетрясение произошло в 95 км к северо-северо-востоку от первого.

Землетрясение магнитудой 7,8 является крупнейшим в Турции наряду с землетрясением той же магнитуды в Эрзинджане 1939 года. Подтверждено более 52 800 смертей: более 46 100 в Турции и более 6 700 в Сирии. Это самое смертоносное сти-

хийное бедствие в современной истории Турции. Землетрясения причинили ущерб на сумму более 100 миллиардов долларов США.

За последнее столетие страна пережила тысячи подземных толчков, из которых 17 были магнитудой выше семи. Землетрясение в Эрзинджане 1939 года, получившее название Великое Эрзинджанское землетрясение, стало одним из самых разрушительных в истории Турции. Оно произошло 27 декабря в 1:57 по местному времени, с магнитудой 7,8 и продолжительностью толчков около 52 секунд в восточной провинции Эрзинджан, в результате чего погибло около 33 тысяч человек и 100 000 человек получили ранения. Землетрясение, разрушившее около 116 000 зданий, считается одним из крупнейших в мире.

В 1999 году произошли землетрясения в Измите (Гёльчукское) и Дюздже 17 августа и 12 ноября соответственно. Землетрясение с центром в Козджаэли / Гёльчук произошло в 03:02 утра 17 августа 1999 года магнитудой $M 7.4-7.6$. Это самое сильное землетрясение за последние годы, повлекшее за собой огромные человеческие жертвы и материальные потери. По официальным данным, около 18 тысяч человек погибли и около 25 тысяч получили ранения. По неофициальной информации, около 50 000 человек погибли и около 100 000 получили ранения. Это землетрясение – одно из крупнейших землетрясений прошлого века с точки зрения силы и ущерба. Землетрясение 17 августа ощущалось во всем Мраморноморском регионе, на обширной территории от Анкары до Измира.

Между 1939 и 1999 годами серия разрушительных сдвиговых землетрясений магнитудой $M 7+$ распространилась на запад вдоль зоны Северо-Анатолийского разлома, начиная с землетрясения $M 7.8$ в Эрзинджане в 1939 году на восточном конце системы Северо-Анатолийского разлома и до землетрясения $M 7.4-7.6$ в Измите в 1999 году у границ Мраморного моря [Ambraseys, Jackson, 2000; Bohnhoff et al., 2013; Stein, Sevilgen, 2025].

Северо-Анатолийский разлом, первый по величине сдвиговый разлом в Турции, вызвал 11 крупных землетрясений в 20 веке. Вдоль Северо-Анатолийского разлома сильные землетрясения происходят каждые 1–10 лет (1939, 1942, 1943, 1944, 1953, 1957, 1966, 1967, 1971, 1992, 1999) с расстоянием между гипоцентрами около 100 км в направлении с востока на запад (рис. 1).

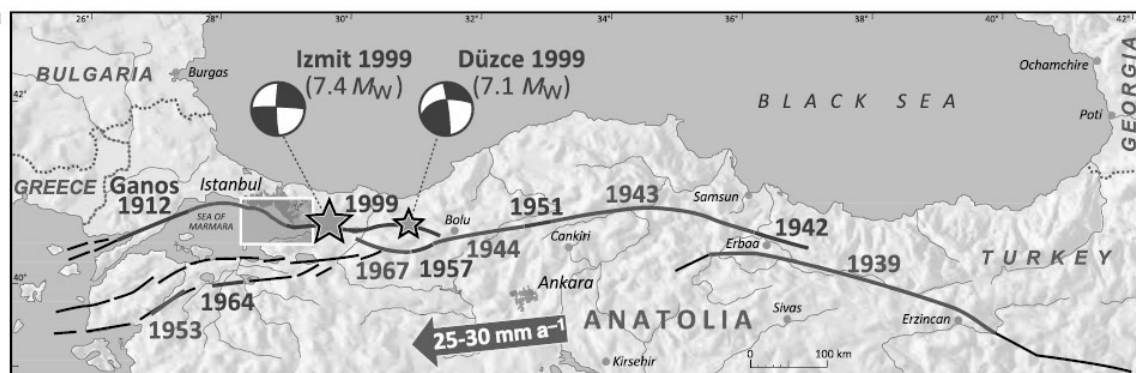


Рис. 1. Северо-Анатолийский разлом и землетрясения 1939–1999 годов [Bohnhoff et al., 2013] /

Fig. 1. North Anatolian Fault and earthquakes of 1939–1999 [Bohnhoff et al., 2013]

Турция расположена в сейсмоопасной зоне, ее территорию пересекает активная Северо-Анатолийская зона разломов (САЗР), которая разделяет Евразийскую и Анатолийскую тектонические плиты, скользящие относительно друг друга со ско-

ростью 2 см в год. Вдоль нее постоянно происходят землетрясения, и активность постепенно смещается все дальше на запад, в Мраморное море, в сторону Стамбула. Сегмент этой зоны, примыкающий к городу, не активировался 250 лет.

Историческое Стамбульское (Константинопольское) землетрясение произошло в районе Босфора и Мраморного моря 10 сентября 1509 г. Эпицентр имел координаты $40^{\circ}54'$ с. ш. $28^{\circ}42'$ в. д. Магнитуда землетрясения составила $7,2 \pm 0,3$. Из-за тяжёлых последствий оно получило название Малый Конец Света (или Землетрясение Судного дня). Султан Баязид II был вынужден перенести столицу в город Эдирне на несколько месяцев. По разным оценкам, погибло от 4000 до 10 000 человек.

Землетрясение нанесло большой ущерб Стамбулу (Мечеть Фатих, Дворец Топкапы, квартал Галаты) и крепостям вдоль Босфора. От подземных толчков и возникшего цунами высотой до 6 метров также пострадали Принцевы острова.

Одно из самых разрушительных землетрясений в истории Османской империи произошло 22 мая 1766 г. Два сильных подземных толчка произошли в районе Стамбула. Первое землетрясение с предполагаемой магнитудой 7,1 с эпицентром $40^{\circ}48'N$ $29^{\circ}00'E$ / $40.8^{\circ}N$ $29^{\circ}E$ произошло в восточной части Мраморного моря, во впадине Чынарджык около Принцевых островов. Погибли от 4000 до 5000 человек. В результате двухминутного землетрясения было разрушено множество зданий. Афтершоки, следовавшие за землетрясением, продолжались 3 месяца. Мечеть Фатих, построенная в 1463 году Султаном Мехмедом II, известным как Фатих (Завоеватель), была полностью разрушена.

Сильные исторические землетрясения 1509 и 1766 годов около Стамбула дали основание предполагать, что период повторяемости сильных землетрясений здесь составляет 250 лет.

Сейсмичность Мраморного моря

Каждое новое сильное землетрясение дает дополнительную информацию о сейсмичности в регионе и позволяет уточнить прогноз и предупреждение последующих возможных разрушительных событий. Распространение сильных землетрясений вдоль Северо-Анатолийского разлома с востока на запад, имеющее определенную закономерность, делает землетрясение в Мраморном море очень важным звеном в этой цепочке и дает новый материал для анализа сейсмичности в окрестностях Стамбула (рис. 2).

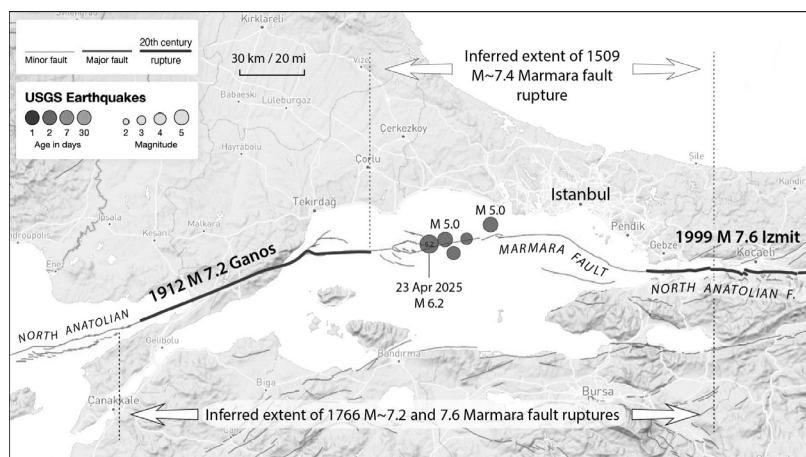


Рис. 2. Землетрясение в Мраморном море 23-4-2025 /

Fig. 2. Earthquake in the Marmara Sea 23-4-2025 (<https://temblor.net/earthquake-insights/a-magnitude-6-2-quake-strikes-the-marmara-fault-at-site-of-large-historic-earthquakes-near-istanbul-16755/>)

Важно понять и исследовать, как землетрясение 2025 года в Мраморном море соотносится с сильными землетрясениями вдоль Северо-Анатолийского разлома 1939–1999 гг., а также с более ранними историческими землетрясениями, которые нанесли сильные разрушения Стамбулу и вызвали большие человеческие жертвы.

Для этого необходимо детально проанализировать сейсмичность Мраморного моря, а также глубинную геодинамику и геотермию всего Анатолийско-Кавказского и окружающих регионов.

Основные землетрясения в регионе Мраморного моря представлены в таблице 1 и на рисунке 3.

Таблица 1 / Table 1

**Землетрясения в регионе Мраморного моря за период 1500–1999 гг.
с магнитудой $M \geq 6,0$. Список является полным для землетрясений с $M \geq 6,8$,
но не для более слабых событий [Ambraseys, Jackson, 2000] /
Earthquakes in the Marmara region for the period 1500–1999
with magnitude $M \geq 6.0$. The list is complete for earthquakes with $M \geq 6.8$,
but not for weaker events [Ambraseys, Jackson, 2000]**

Year	Date	Time	Lat.	Long.	M
1509	9-10	22:00	40.9	28.7	7.2
1556	5-10	24:00	40.3	27.8	7.2
1719	5-25	12:00	40.7	29.8	7.4
1737	3-6	07:30	40.1	27.3	7.0
1754	9-2	03:30	40.8	29.2	6.8
1766	5-22	05:00	40.8	29.0	7.1
1766	8-5	05:30	40.5	26.6	7.4
1809	2-7	00:00	40.0	27.0	6.1
1826	2-8	20:30	39.8	26.4	6.2
1841	10-6	02:30	40.85	29.05	6.1
1850	4-19	23:30	40.1	28.3	6.1
1855	2-28	02:30	40.1	28.6	7.1
1855	4-11	19:40	40.2	28.9	6.3
1859	8-21	11:30	40.3	26.1	6.8
1860	8-22	10:09	40.5	26.0	6.1
1893	2-9	17:16	40.5	26.2	6.9
1894	7-10	12:24	40.7	29.6	7.3
1912	8-9	01:28	40.7	27.2	7.3
1912	8-10	09:23	40.8	27.5	6.2
1912	9-13	23:31	40.7	27.0	6.8
1935	1-4	14:41	40.50	27.60	6.4
1935	1-4	16:20	40.55	27.75	6.3
1943	6-20	15:32	40.68	30.48	6.4
1944	10-6	02:34	39.7	26.5	6.8
1953	3-18	19:06	40.0	27.4	7.1
1956	2-20	20:31	39.84	30.41	6.2
1957	5-26	06:33	40.6	31.0	7.2
1963	9-18	16:58	40.70	28.95	6.4
1964	10-6	14:31	40.1	28.2	6.8
1967	7-22	16:57	40.7	30.7	7.2
1975	3-27	05:15	40.45	26.12	6.5
1983	7-5	12:01	40.28	27.76	6.1
1999	8-17	00:01	40.7	30.0	7.4

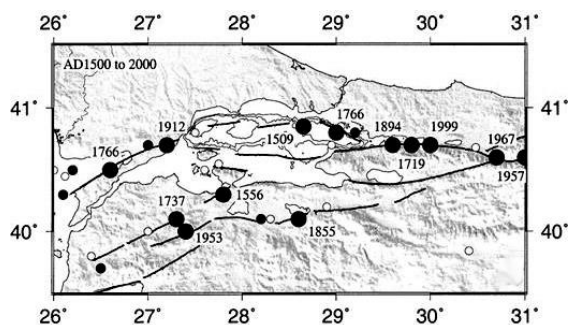


Рис. 3. Землетрясения в регионе Мраморного моря за период 1500–1999 гг. с магнитудой $M \geq 6,0$. Основные землетрясения в регионе Мраморного моря из Таблицы 1. Большие черные круги – события с $M \geq 7,0$, маленькие черные круги – с $7,0 > M \geq 6,6$, а белые круги – с $6,6 > M \geq 6,0$. Только те, у которых $M \geq 7,0$, помечены датами [Ambraseys, Jackson, 2000] /

Fig. 3. Earthquakes in the Sea of Marmara region during the period 1500–1999 with magnitude $M \geq 6.0$. The main earthquakes in the Sea of Marmara region are from Table 1. Large black circles are events with $M \geq 7.0$, small black circles are those with $7.0 > M \geq 6.6$, and white circles are those with $6.6 > M \geq 6.0$. Only those with $M \geq 7.0$ are labeled with dates [Ambraseys, Jackson, 2000]

Северо-Анатолийский разлом представляет собой правосторонний сбросо-сдвиговый разлом протяженностью около 1200 км. Он тянется от Саросского залива в Эгейском море на западе до Карлиовского тройного разлома при сочленении с Восточно-Анатолийским разломом на востоке. Формирование разлома началось примерно 13–11 миллионов лет назад на востоке Анатолии и со временем распространилось на запад. Разлом в районе Мраморного моря окончательно сформировался около 200 000 лет назад, хотя движение сдвигового характера в этой полосе началось ещё в позднем миоцене.

На восточной части Северо-Анатолийского разлома до Измита зона разлома представляет собой четко определенную морфологическую структуру, которая повторяет границу Анатолийской и Евразийской плит. Зона достаточно узкая, локализованная и фактически разделяет относительно жесткие регионы Черного моря и Центральной Анатолии.

Правосторонний сдвиг со смещением продолжается к западу от Измита, но становится распространенным по нескольким субпараллельным полосам в Мраморном море, северо-западной Турции и северной части Эгейского моря [Barka, Kadinsky-Kade, 1988; Taymaz et al., 1991]. Сейсмические исследования в Мраморном море выявляют множество разломов с большими нормальными компонентами [Okay et al., 1999], а землетрясения с механизмами нормальных сбросов наблюдаются вокруг его границ. Мраморное море предположительно было образовано растяжением земной коры по механизму пул-апарт (pull-apart). Исследования GPS показывают, что сдвиг с востока на запад по всей области рисунка 3 составляет около 23 ± 3 мм в год [Straub et al., 1997; McClusky et al., 2000].

Методика исследования

Построение геодинамической и геотермической модели Кавказско-Анатолийско-Аравийского региона

Причиной продвижения землетрясений вдоль Восточно-Анатолийского разлома может служить глубинный мантийный поток, поднимающийся от границ ядра под Большой Африканский рифт (рис. 4).

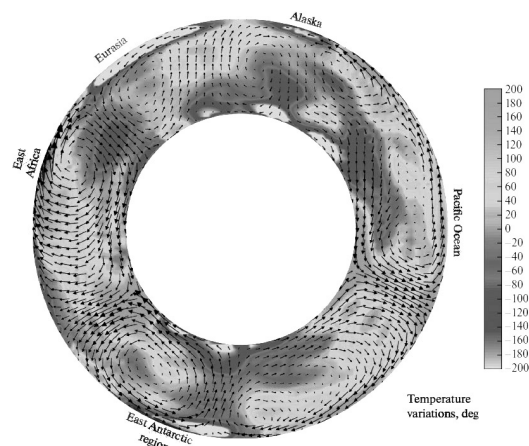


Рис. 4. Распределение аномалий температуры и скорости в мантии Земли в поперечном сечении по 40° и 220° в.д. [Baranov et al., 2023] /

Fig. 4. Distribution of temperature and velocity anomalies in the Earth's mantle in the cross section along 40° and 220° E [Baranov et al., 2023]

Глубинные мантийные потоки распространяются на север к Кавказскому региону, где разделяются на три ветви – на запад к Анатолийской плите, на восток к Аравийской плите и на север к Евразийской плите и структуре Кавказа (рис. 5).

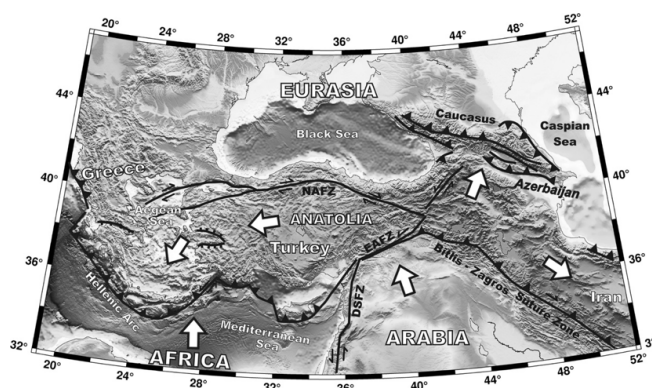


Рис. 5. Геодинамика Кавказско-Анатолийско-Аравийского региона (USGS) /

Fig. 5. Geodynamics of the Caucasus-Anatolian-Arabian region (USGS)

Важным моментом является переход событий в регион Мраморного моря, что меняет реологическую обстановку вследствие уменьшения толщины коры и динамики формирования и эволюции осадочного бассейна. Замеченные особенности сейсмичности в Мраморном море способствуют решению некоторых задач прогноза и предупреждения землетрясений. Так, было замечено, что длина активных элементов Северо-Анатолийского разлома в море короче, чем на суше в восточной части разлома. Землетрясения в море слабее, чем на континенте. А также существуют сейсмические окна (бреши), где землетрясения не происходят много лет. Так, часть Северо-Анатолийского разлома, примыкающая к Стамбулу, не активизировалась с 1766 года. Важным моментом анализа является то, что цепочка землетрясений вдоль Северо-Анатолийского разлома, продвигаясь на запад, перескочила город Стамбул, что хорошо укладывается в концепцию продвижения, когда предыдущим сильным землетрясением было землетрясение 1999 года на востоке Мраморного

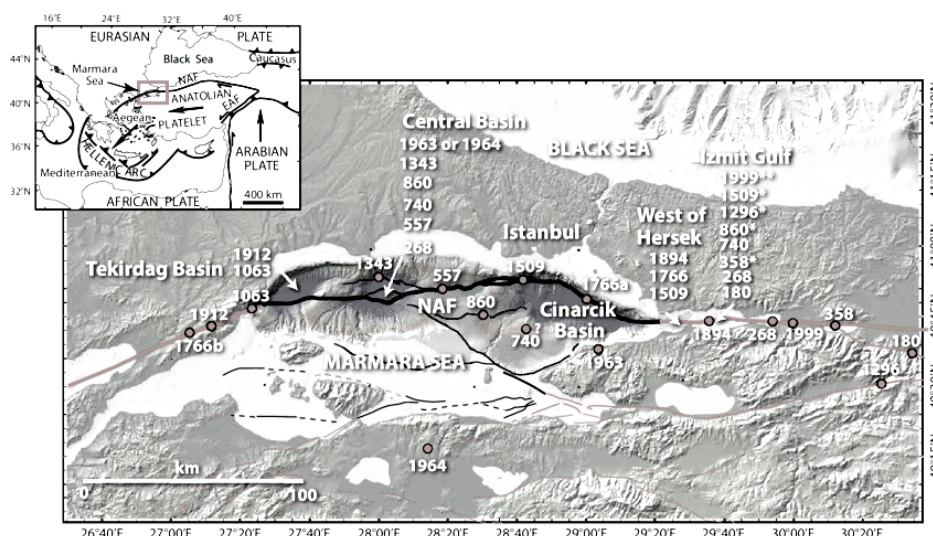


Рис. 7. Исторические землетрясения и бассейны Мраморного моря [Mchugh et al., 2014] /

Fig. 7. Historical earthquakes and basins of Marmara Sea [Mchugh et al., 2014]

Тепловой поток в центре впадин является повышенным, а границы впадин находятся в более хрупком состоянии, подверженном землетрясениям. Более горячая среда в центре депрессий способствует снижению вязкости и меньше способствует накоплению энергии упругого напряжения для последующего землетрясения, когда достигается предел прочности пород и происходит разрядка напряжений (рис. 8).

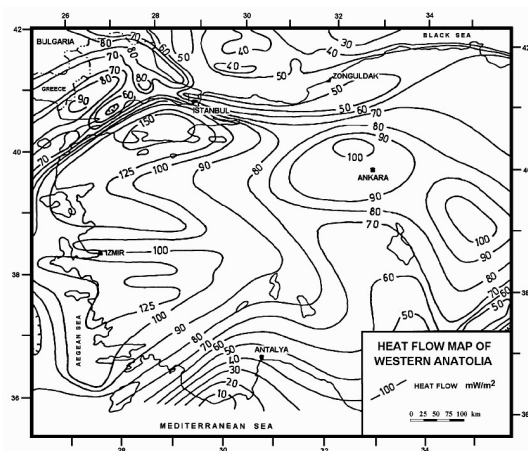


Рис. 8. Карта теплового потока западной Анатолии [Gokturkler et al., 2003] /

Fig. 8. Heat flow map of western Anatolia [Gokturkler et al., 2003]

Обсуждение и результаты

Можно рассматривать два механизма достижения предела прочности пород на глубине для формирования очага землетрясения, связанных с геодинамикой движения вещества в литосфере. Это активизация сейсмогенерирующих разломов вследствие горизонтального движения литосферных плит и вертикальный подъем вещества в виде мантийных диапиров вследствие гравитационной неустойчивости. Это механизмы сочетания плит-тектоники и плюм-тектоники. Оба эти механизма реализуются в Мраморном море в окрестности Стамбула в виде активизации Северо-

Анатолийского разлома при продвижении очагов землетрясений с востока на запад и в виде геотермической контрастности в литосфере на границе поднимающегося мантийного диапира у морского побережья в районе Босфора, что также может сопровождаться формированием разломов вдоль границ бассейна.

Зная общие закономерности механического поведения вещества литосферы в различных геодинамических обстановках и в процессе подготовки землетрясений, следует детально анализировать геолого-геофизические данные и строить геодинамические и геотермические модели сейсмичных и асейсмичных зон и регионов с целью прогноза и предупреждения опасных природных процессов (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Геолого-геофизические данные для Альпийского и Тихоокеанского поясов /
Geological-geophysical data for Alpine and Pacific belts**

Структуры / Structures	Толщина осадочного чехла (км) / Thickness of sedimentary cover (km)	Толщина кристаллической коры (км) в центре (числитель) в окружении (знаменатель) Thickness of crystalline crust (km) in the center (numerator) surrounded (denominator)	Тепловой поток (мВт / м ²) Heat flow (mW/m ²)	Сейсмичность + высокая - низкая В центре (числитель) в окружении (знаменатель) Seismicity + high - low In the center (numerator) surrounded (denominator)
1. Тирренское море/ Tyrrhenian Sea	6	16/45	30–160	- /+
2. Эгейское море/ Aegean Sea	3	15/23	100	- /+
3. Черное море/ Black Sea	16	15/45	30–35	- /+
4. Прикаспийская впадина/ Pre- Caspian Depression	24	12/40	40	-/-
5. Южно- Каспийская впадина/South- Caspian Depression	20	12/45	40–50	- /+
6. Ионическое море (юг)/ Ionian Sea (South)	12	10/35	30–40	- /+
7. Ионическое море (север)/ Ionian Sea (North)	8	10/30	50–70	- /+
8. Балеарское море/ Balearic Sea	8	10/40	50	- /+
9. Левантийская впадина/ Levantine Basin	6	8/30	30	- /+

10. Паннонская впадина/ Pannonian Basin	9	18/27	90	-/-
11. Алеутская впадина/ Aleutian Basin	5	10/26	60–80	- /+
12. Охотское море/ Sea of Okhotsk	4	8/20	100	- /+
13. Японское море/ Sea of Japan	2	12/29	100–120	- /+
14. Филиппинское море/ Philippine Sea	2	6/13	60	- /+
15. Мраморное море/ Sea of Marmara	3	15/35	150	- /+
16. Турция/ Turkey	0–2	40/40	70–120	+ /+
17. Кавказ/ Caucasus	0–2	60/40	70	+ /+

Детальный анализ геолого-геофизических данных дает возможность выявить основные закономерности взаимосвязи геотермии, сейсмичности, толщин слоев литосферы, а также возраста геологических структур. Сочетание тонкой коры и высокого теплового потока сопровождается пониженной сейсмичностью, что характерно для осадочных бассейнов и морских впадин. Высокий тепловой поток в сочетании с толстой корой сопровождается высокой сейсмичностью. Это случай Кавказа и Турции. Толстая кора способствует упрочнению коры, а высокий тепловой поток снижает прочность коры. Оба механизма действуют в противоположных направлениях, но результат для сейсмичности зависит от соотношения геолого-геофизических параметров. Кора должна быть достаточно толстой, а высокий тепловой поток отражает высокую геодинамическую активность региона по типу коллизии литосферных плит для Кавказа или подъема глубинных мантийных потоков, что характерно для Турции. Хорошо известна зависимость тепловой поток – возраст тектоно-магматической активизации. Связь плотности «поверхностного» теплового потока с возрастом тектоно-магматической активности в континентальной коре детально исследована [Поляк, Смирнов, 1966; Хуторской, 2023]. Чем выше тепловой поток, тем моложе кора. Также тонкая кора ассоциируется с высоким тепловым потоком, как видно на границе Тейссера-Торнквиста, разделяющей тонкую (молодую) и толстую (древнюю) кору в Европе. Зона Тейссера-Торнквиста (также называемая Trans-European Suture Zone, или Транс-Европейская шовная зона TESZ) – демаркационная линия между Восточно-Европейским кратоном, относящимся к докембрию, и фанерозойскими орогенами юго-западной Европы. Зона простирается от Северного до Черного морей. Сейсмические и гравитационные данные подтверждают сильный контраст в толщине земной коры от 28–35 км к западу от шовной зоны до 42–47 км к востоку.

Этим же объясняется пониженный тепловой поток Черного моря, когда на большой глубине фиксируются пониженные температуры к востоку от линии Тейссера-Торнквиста (рис. 9).

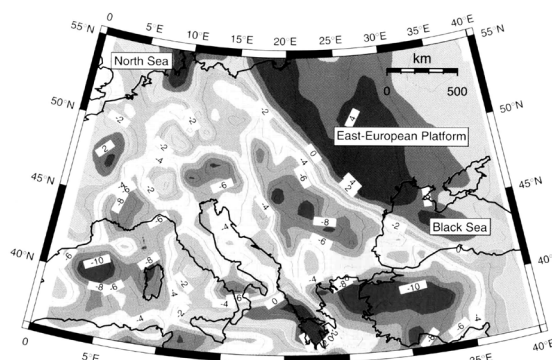


Рис. 9. Вариации скоростей сдвиговых волн (в %) под Европой на глубине 80 км. Пониженные скорости характеризуют молодую фанерозойскую Западную Европу. Высокие скорости соответствуют древней Восточно-Европейской платформе [EUROPROBE ..., 1996] /

Fig. 9. Shear wave velocity variations (in%) underneath Europe at a depth of 80 km. The lower velocities characterize the young Phanerozoic Western Europe. The higher velocities correspond to the ancient East European platform [EUROPROBE ..., 1996]

Выводы

Возможны два механизма достижения предела прочности пород на глубине для формирования очага землетрясения. Это активизация сейсмогенерирующих разломов вследствие горизонтального движения литосферных плит и вертикальный подъем вещества в виде мантийных диапиров вследствие гравитационной неустойчивости. Это механизмы сочетания плит-тектоники и плюм-тектоники. Оба эти механизма реализуются в Мраморном море в окрестности Стамбула в виде активизации Северо-Анатолийского разлома при продвижении очагов землетрясений с востока на запад и в виде геотермической контрастности в литосфере на границе поднимающегося мантийного диапира у морского побережья в районе Босфора.

Причиной продвижения землетрясений вдоль Северо-Анатолийского разлома может служить глубинный мантийный поток, поднимающийся от границ ядра под Большой Африканский рифт, известный на земной поверхности как Афарский плюм. Глубинные мантийные потоки распространяются на север к Кавказскому региону, где разделяются на три ветви – на запад к Анатолийской плите, на восток к Аравийской плите и на север к Евразийской плите и структуре Кавказа.

Можно считать, что сильные землетрясения, распространяющиеся вдоль Северо-Анатолийского разлома с востока на запад, преодолели окрестности Стамбула и продвигаются дальше на запад к Эгейскому морю, свидетельством чего служит землетрясение 2025 года западнее Стамбула, что говорит о снижении сейсмического риска для Стамбула в ближайшее время в плане горизонтальных движений по разлому.

Опасность сильного землетрясения по типу продвижения вдоль Северо-Анатолийского разлома для Стамбула снижается вследствие землетрясения в Мраморном море 2025 года. В то же время опасность от возможного землетрясения по типу исторических землетрясений геотермического механизма вследствие гравитационной неустойчивости и формирования очага землетрясения у границ депрессии остается высокой. Такое землетрясение с периодом 250 лет (1509 г., 1766 г.) в окрестности Стамбула может произойти в течение ближайших нескольких лет.

Литература

1. Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я. Сейсмологические индикаторы геодинамических обстановок формирования землетрясений на территории Турции в 2023 году. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 19–32. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.80.002.
2. Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Заалишвили В.Б., Мкртчян М.А., Саакян Б.В., Оганесян С.М., Карапетян Р.К., Мкртчян Г.А. Разрядка сейсмотектонических напряжений Восточно-Турецкого землетрясения 06 февраля 2023 г. Mw = 7.8 как процесс деструкции геологической среды очаговой области. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 3. – С. 71–84. DOI: 10.46698/u8883-5565-8869-f.
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 (Mw=7,8). // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 42–54. DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004.
4. Поляк Б.Г., Смирнов Я.Б. Тепловой поток на континентах. // Доклады академии наук СССР. – 1966. – Т. 168(1). – С. 170–172.
5. Свалова В.Б., Заалишвили В.Б. Геодинамика и геоэкология. – М.:, Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН, 2024а. – 346 с.
6. Свалова В.Б., Заалишвили В.Б. Глубинная геодинамика и сейсмичность Кавказско-Анатолийского региона. // Геология и геофизика Юга России. – 2024б. – Т. 14. № 2. – С. 77–89. DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006.
7. Хуторской М.Д. Региональное тепловое поле и геотермальные ресурсы Кавказского региона. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 73–88. DOI: 10.46698/VNC.2023.51.69.006.
8. Ambraseys N.N., Jackson J.A. Seismicity of the Sea of Marmara (Turkey) since 1500. *Geophysical Journal International*. 2000. Vol. 141. Issue 3. pp. F1–F6. DOI: 10.1046/j.1365-246x.2000.00137.x.
9. Baranov A.A., Lobkovskii L.I., Bobrov A.M. Global geodynamic model of the modern Earth and its application to the Antarctic Region. *Doklady Earth Sciences*. 2023. Vol. 512. Part 1. pp. 854–858. DOI: 10.1134/S1028334X23601086.
10. Barka A., Kadinsky-Cade K. Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics*. 1988. Vol. 7. pp. 663–684.
11. Bohnhoff M., Bulut F., Dresen G., Malin P.E., Eken T., Aktar M. An earthquake gap south of Istanbul. *Nature Communications*. 2013. Vol. 4. Art. No. 1999. DOI: 10.1038/ncomms2999.
12. EUROPROBE 1996 – Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents. Eds. D.G. Gee, H.J. Zeyen. Uppsala University. 1996. 138 p.
13. Garzon P., Bohnhoff M., Nurlu M. Crustal thickness variation across the Sea of Marmara region, NW Turkey: A reflection of modern and ancient tectonic processes. *Tectonics*. 2020. Vol. 39. Art. No. e2019TC005986.
14. Gokturkler G., Salk M., Sari C. Numerical modeling of the conductive heat transfer in western Anatolia. *Journal of the Balkan Geophysical Society*. 2003. Vol. 6. No. 1. pp. 1–15.
15. McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., Georgiev I., Gurkan O., Hamburger M. et al. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*. 2000. Vol. 105. No. B3. pp. 5695–5719.
16. Mchugh C.M.G., Seeber L., Cormier M.-H., Hornbach M. Submarine paleoseismology along populated transform boundaries: The Enriquillo-Plantain-Garden Fault, Canal du Sud, Haiti, and the North Anatolian Fault, Marmara Sea, Turkey. *Oceanography*. 2014. Vol. 27. Issue 2. pp. 118–131. DOI: 10.5670/oceanog.2014.47.
17. McKenzie D. Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions. *Geophys. J. R. astr. Soc.* 1978. Vol. 55. pp. 217–254.

18. Okay A.I., Demirbag E., Kurt H., Okay N., Kusu I. An active, deep marine strike-slip basin along the North Anatolian Fault, Turkey. *Tectonics*. 1999. Vol. 18. pp. 129–147.
19. Straub C., Kahle H.-G., Schindler C. GPS and geologic estimates of the tectonic activity in the Marmara Sea region, NW Anatolia. *Journal of Geophysical Research*. 1997. Vol. 102. Issue 27. pp. 587–610.
20. Svalova V. Geodynamics of the Caucasus – Anatolian-Arabian region and Turkey-Syria Earthquakes 2023. *Journal of Basic & Applied Sciences*. 2023. Vol. 19. pp. 40–59.
21. Taymaz T., Jackson J., McKenzie D. Active tectonics of the north and central Aegean Sea. *Geophysical Journal International*. 1991. Vol. 106. pp. 433–490.

References

1. Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya. Seismological indicators of geodynamic conditions of earth-quakes formation in Turkey in 2023. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13 No. 3. pp. 19–32. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.80.002. (In Russ.)
2. Geodakyan E.G., Karapetyan J.K., Zaalishvili V.B., Mkrtchyan M.A., Sahakyan B.V., Hovhannisyan S.M., Karapetyan R.K., Mkrtchyan G.A. Release of seismotectonic stresses of the Eastern Turkey earthquake on 06 February 2023 Mw = 7.8 as a destruction process in focal area. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 71–84. DOI: DOI: 10.46698/u8883-5565-8869-f. (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 (Mw = 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. Polyak B.G., Smirnov Ya.B. Heat flow on continents. *Doklady Earth Sciences USSR*. 1966. Vol. 168(1). pp. 170–172. (In Russ.)
5. Svalova V.B., Zaalishvili V.B. Geodynamics and Geoecology. Moscow. Vladikavkaz. GPI VSC RAS. 2024a. 346 p. (In Russ.)
6. Svalova V.B., Zaalishvili V.B. Deep geodynamics and seismicity of the Caucasus-Anatolian region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024b. Vol. 14. No. 2. pp. 77–89. DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006. (In Russ.)
7. Khutorskoy M.D. Regional thermal field and geothermal resources of the Caucasus region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 73–88. DOI: 10.46698/VNC.2023.51.69.006. (In Russ.)
8. Ambraseys N.N., Jackson J.A. Seismicity of the Sea of Marmara (Turkey) since 1500. *Geophysical Journal International*. 2000. Vol. 141. Issue 3. pp. F1–F6. DOI: 10.1046/j.1365-246x.2000.00137.x.
9. Baranov A.A., Lobkovskii L.I., Bobrov A.M. Global geodynamic model of the modern Earth and Its application to the Antarctic Region. *Doklady Earth Sciences*. 2023. Vol. 512. Part 1. pp. 854–858. DOI: 10.1134/S1028334X23601086.
10. Barka A., Kadinsky-Cade K. Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics*. 1988. Vol. 7. pp. 663–684.
11. Bohnhoff M., Bulut F., Dresen G., Malin P.E., Eken T., Aktar M. An earthquake gap south of Istanbul. *Nature Communications*. 2013. Vol. 4. Art. No. 1999. DOI: 10.1038/ncomms2999.
12. EUROPROBE 1996 – Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents. Eds. D.G. Gee, H.J. Zeyen. Uppsala University. 1996. 138 p.
13. Garzon P., Bohnhoff M., Nurlu M. Crustal thickness variation across the Sea of Marmara region, NW Turkey: A reflection of modern and ancient tectonic processes. *Tectonics*. 2020. Vol. 39. Art. No. e2019TC005986.
14. Gokturkler G., Salk M., Sari C. Numerical modeling of the conductive heat transfer in western Anatolia. *Journal of the Balkan Geophysical Society*. 2003. Vol. 6. No. 1. pp. 1–15.

15. McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., Georgiev I., Gurkan O., Hamburger M. et al. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*. 2000. Vol. 105. No. B3. pp. 5695–5719.
16. Mchugh C.M.G., Seeber L., Cormier M.-H., Hornbach M. Submarine paleoseismology along populated transform boundaries: The Enriquillo-Plantain-Garden Fault, Canal du Sud, Haiti, and the North Anatolian Fault, Marmara Sea, Turkey. *Oceanography*. 2014. Vol. 27. Issue 2. pp. 118–131. DOI: 10.5670/oceanog.2014.47.
17. McKenzie D. Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions. *Geophys. J. R. astr. Soc.* 1978. Vol. 55. pp. 217–254.
18. Okay A.I., Demirbag E., Kurt H., Okay N., Kuscu I. An active, deep marine strike-slip basin along the North Anatolian Fault, Turkey. *Tectonics*. 1999. Vol. 18. pp. 129–147.
19. Straub C., Kahle H.-G., Schindler C. GPS and geologic estimates of the tectonic activity in the Marmara Sea region, NW Anatolia. *Journal of Geophysical Research*. 1997. Vol. 102. Issue 27. pp. 587–610.
20. Svalova V. Geodynamics of the Caucasus – Anatolian-Arabian region and Turkey-Syria Earthquakes 2023. *Journal of Basic & Applied Sciences*. 2023. Vol. 19. pp. 40–59.
21. Taymaz T., Jackson J., McKenzie D. Active tectonics of the north and central Aegean Sea. *Geophysical Journal International*. 1991. Vol. 106. pp. 433–490.

DOI: 10.46698/VNC.2025.55.83.002

Original paper

Ambient seismic tomography of the lithosphere of Azerbaijan region

G.J. Yetirmishli[✉], S.E. Kazimova[✉]

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

Received: 05.05.2025, revised: 28.08.2025, accepted: 02.09.2025

Abstract: The aim of this study is to construct two-dimensional tomographic models of the structure of the Earth's crust and upper mantle of the Caucasus region using the dispersion characteristics of Rayleigh waves extracted from ambient seismic noise. The relevance of the work is due to the high seismic activity and geodynamic complexity of the Caucasus – one of the key links of the Alpine-Himalayan orogenic belt, where the ongoing interaction of lithospheric plates generates intense deformation processes. Seismic interferometry based on cross-correlation of seismic noise records was used as the main method, which made it possible to restore Green's functions and extract dispersion curves for subsequent inversion of group and phase velocities. The study covers the period from 2012 to 2024 and uses data from more than 70 seismic stations installed in Azerbaijan, Georgia and Turkey. As a result of seismic noise analysis, maps of Rayleigh wave group velocity variations at depths from 20 to 200 km were constructed, which made it possible to identify pronounced lithospheric heterogeneities of the Caucasus region. In the South Caspian Basin, the Kura and Alazani depressions, areas of reduced velocities were discovered, indicating the presence of thick sedimentary strata and a thermally weakened crust. Similar anomalies were found under large volcanoes (Elbrus, Kazbek, Ararat), interpreted as potential magmatic centers. High-velocity anomalies corresponding to a thickened, dense crust were recorded in the areas of the Lesser Caucasus and northern Iran, and at depths of 50–200 km – stable zones of the lithospheric mantle. In the eastern part of the Caucasus, signs of subduction processes are traced: deep-focus earthquakes and increased velocities in the mantle. Sharp contrasts are observed across the region's mantle: from extremely low velocities in the west to extremely high velocities in the east and in the South Caspian zone.

Keywords: seismic noise, tomography, Rayleigh waves, South Caspian basin, lithosphere, upper mantle, cross-correlation, FTAN, group velocities.

For citation: Yetirmishli G.J., Kazimova S.E. Ambient seismic tomography of the lithosphere of Azerbaijan region. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 24-36. DOI: 10.46698/VNC.2025.55.83.002

УДК 550.334

DOI: 10.46698/VNC.2025.55.83.002

Оригинальная статья

Томография литосферы Азербайджанского региона на основе сейсмических шумов

Г.Дж. Етирмишли[✉], С.Э. Казимова[✉]

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

Статья поступила: 05.05.2025, доработана: 28.08.2025, принята к публикации: 02.09.2025

Резюме: Целью настоящего исследования является построение двумерных томографических моделей структуры земной коры и верхней мантии Кавказского региона с использованием дисперсионных характеристик волн Рэлея, извлечённых из амбиентного сейсмического шума. **Актуальность работы** обусловлена высокой сейсмической активностью и геодинамической сложностью Кавказа – одного из ключевых звеньев Альпийско-Гималайского орогенного пояса, где продолжающееся взаимодействие литосферных плит порождает интенсивные деформационные процессы. В качестве **основного метода** применена сейсмическая интерферометрия, основанная на кросс-корреляции записей сейсмического шума, что позволило восстановить функции Грина и извлечь дисперсионные кривые для последующей инверсии групповых и фазовых скоростей. Исследование охватывает период с 2012 по 2024 гг. и использует данные более 70 сейсмических станций, установленных на территории Азербайджана, Грузии и Турции. **В результате** анализа сейсмического шума были построены карты вариаций групповой скорости волн Рэлея на глубинах от 20 до 200 км, что позволило выявить выраженные литосферные неоднородности Кавказского региона. В Южно-Каспийском бассейне, Куринской и Алазанской впадинах обнаружены области пониженных скоростей, указывающие на наличие мощных осадочных толщ и термически ослабленной земной коры. Под крупными вулканами (Эльбрус, Казбек, Арарат) выявлены аналогичные аномалии, интерпретируемые как потенциальные магматические очаги. В районах Малого Кавказа и северного Ирана зафиксированы высокоскоростные аномалии, соответствующие утолщённой, плотной коре, а на глубинах 50–200 км – устойчивым зонам литосферной мантии. В восточной части Кавказа прослеживаются признаки субдукционных процессов: глубокофокусные землетрясения и повышенные скорости в мантии. По мантии региона наблюдаются резкие контрасты: от сверхнизких скоростей на западе до сверхвысоких – на востоке и в Южно-Каспийской зоне.

Ключевые слова: сейсмический шум, томография, волны Рэлея, Южно-Каспийский бассейн, литосфера, верхняя мантия, кросс-корреляция, FTAN, групповые скорости.

Для цитирования: Етирмишли Г.Дж., Казимова С.Э. Томография литосферы Азербайджанского региона на основе сейсмических шумов. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 24-36. DOI: 10.46698/VNC.2025.55.83.002

Introduction

One of the key goals of modern seismology is to study the internal structure of the Earth. Scientific works of the last decades confirm that seismic approaches remain the most effective and reliable tools for studying the structure and physical characteristics of our planet. Since the mid-1970s, seismic tomography, first described in the works of Aki, Lee and others [Aki, Lee, 1976; Aki et al., 1977; Dziewoński et al., 1975], has become

a fundamental method of georesearch. Over the years, seismic tomography technologies have improved significantly, becoming an indispensable element of geoscientists. Three-dimensional (3D) models created with its help reflect variations in seismic velocities and density, revealing the dynamics and composition of the interior of the Earth and other planets. They help to study the structure of active volcanic zones and faults, determine internal flows in glaciers and polar caps, identify underground reservoirs and storage facilities, and accurately model earthquake-induced ground displacements. Seismic methods are divided into two main categories: the first is based on the analysis of the arrival time of body waves generated by earthquakes or explosions; the second uses the spectral characteristics of the waves, including the velocity dispersion of Rayleigh and Love surface waves. Seismic noise, previously considered a nuisance, is now regarded as a valuable source of data due to the development of seismic interferometry [Campillo, Paul, 2003; Wapenaar, 2004; Shapiro et al., 2005; Wapenaar et al., 2011]. This technique allows extracting useful signals from ambient noise, creating seismic velocity distribution maps and constructing tomographic images. The advantage of the approach is its universality: noise is present everywhere, which makes the method applicable even in regions with minimal seismic activity. Cross-correlation of noise records obtained at two seismic stations allows reconstructing the empirical Green's function describing the medium between them [Snieder, 2004; Weaver, Lobkis, 2001; Wapenaar, 2004]. This function is equivalent to the seismogram that would be recorded if one station acted as a source of an impulsive signal [Wapenaar, 2004]. The present study is aimed at constructing two-dimensional tomographic models of the structure of the Earth's crust and upper mantle of the Caucasus region using the dispersion characteristics of Rayleigh waves. The Caucasus is the subject of numerous seismic tomographic studies, which used various techniques, mainly based on the analysis of body waves, both in large-scale and local studies, including deep sounding [Kazimova, 2020; Svalova, 2019; Svalova, Zaalishvili, 2024; Giorgobiani, 2020; Stogny et al., 2023]. It should be noted that the amplitudes of surface waves significantly exceed the amplitudes of body waves, as a result of which the latter are often masked in seismic records, which complicates their processing and interpretation. Surface waves, due to their high sensitivity to the upper layers of the lithosphere, are an effective tool for studying the near-surface structure of the Earth's crust, which is especially important for engineering-geological and environmental problems.

Geodynamic and tectonic evolution of the Caucasus region

The Caucasus region is one of the most complex and active geotectonic zones of the Alpine-Himalayan orogenic belt, formed as a result of long-term collision tectonics between the Arabian and Eurasian plates within the Iranian segment (fig. 1). The modern structure of the region is due to the ongoing convergence of the Arabian and African plates with Eurasia for more than 100 million years, during which the lithosphere of the Neotethys Ocean gradually sank beneath the Eurasian continent.

The modern tectonic setting is characterized by active convergence in Eastern Turkey, the Caucasus and within the Anatolian plate. The westward displacement of the Anatolian block is compensated by the activity of the North Anatolian and East Anatolian faults. The segmentation of deformation processes in the collision zone covers both eastern Turkey and the Caucasus, influencing orogenesis and magmatic activity within the Turkish-Iranian Plateau. In the east of the region, the initial stage of subduction of the South

Caspian Basin under the continental crust of the Middle Caspian along the Absheron-Cheleken sill is recorded [Mammadli, Muradov, 2023]. The Greater Caucasus was formed as a result of tectonic inversion of the Mesozoic basin located on the continental crust north of the Neotethys subduction zone. The eastern Black Sea and the South Caspian are considered as residual oceanic basins formed in the Jurassic and Cretaceous periods. The Oligocene sedimentary strata of the Kura and Rioni basins are characterized by an asymmetric structure with predominant subsidence on the southern margins, which is probably associated with tectonic influence from the Lesser Caucasus [Ismail-Zadeh et al., 2020].

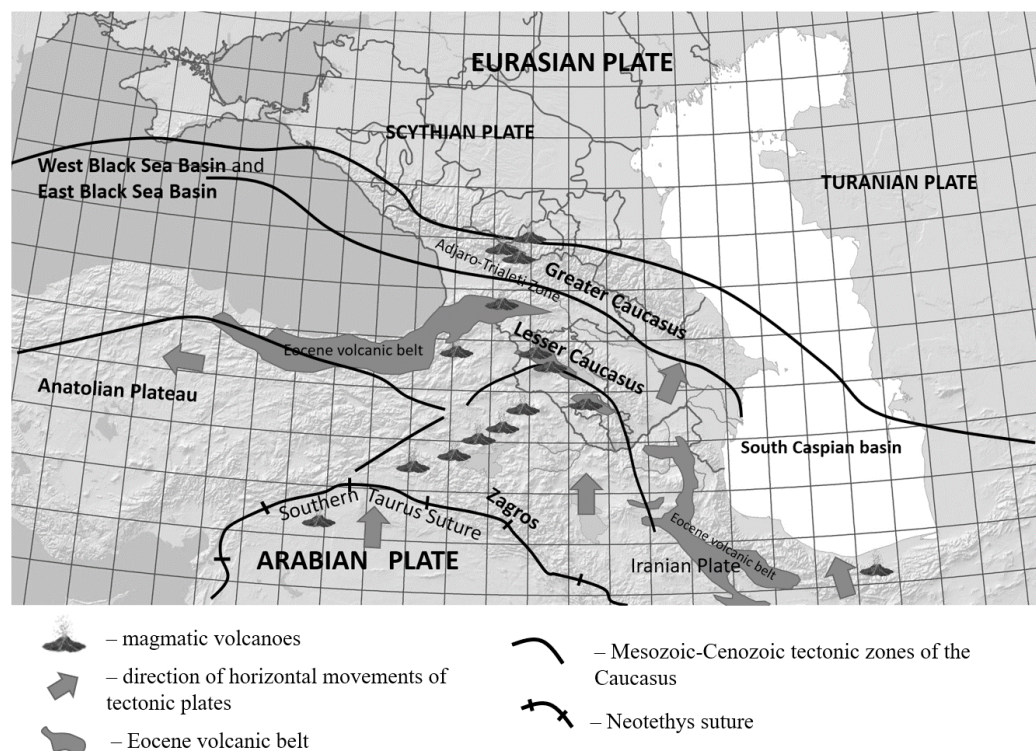


Fig. 1. Tectonic map of the Caucasus compiled according to data from Afanasev A.P., Nikishin A.M., Obukhov A.N. [2007]

Seismotectonic studies of the region indicate the prevalence of compression with the main axis oriented in the north-northeast direction, coinciding with the general strike of the Caucasus ranges. The extension axis is usually oriented vertically. These patterns are confirmed by the focal mechanisms of earthquakes identified on the basis of instrumental data. The set of geodynamic features corresponds to the plate tectonics model, according to which the collisional interaction of the Arabian and Eurasian plates causes transverse compression and determines the high seismic activity of the region. The southern slope of the Greater Caucasus demonstrates particular tectonic activity, where the most powerful earthquakes with a high level of seismic energy are observed. According to GPS measurements, the convergence rate between the Greater and Lesser Caucasus is about 10 ± 2 mm/year, with about 60% of the deformation concentrated within the Greater Caucasus. Despite the moderate current compression recorded within the ridge, the observed rates of shortening do not fully explain the existing geodynamic processes [Yetirmishli, Kazimov, 2022]. Geologically, the region is represented by Paleozoic metamorphic complexes, granitoid intrusions and Jurassic sediments, with signs of Mesozoic and

Cenozoic volcanism. The Lesser Caucasus is characterized by a basement of Paleozoic granitoid-metamorphic rocks overlain by Paleozoic and Triassic carbonates [Dilek et al., 2010]. Young magmatism of the region, which developed at the late stage of collisional interaction, is classified as post-collisional. Neogene-Quaternary volcanic formations are close in geochemical characteristics to intraplate basalts of the continental type. According to petrological data, the source of magmatic melts is metasomatized asthenospheric mantle, affected by subduction processes of the Neotethys remnants. Various petrogenetic models have been proposed to explain the mechanism of this magmatism. Of particular interest are areas where continental collision ended in the Neogene-Quaternary, allowing us to trace the transition from syncollisional to postcollisional and possibly intraplate magmatism. One key example is Eastern Anatolia, where the Neotethys Ocean closed and oceanic crust subducted beneath the active Eurasian margin in the late Mesozoic and early Cenozoic. The completion of this process in the Miocene was accompanied by significant vertical uplift, resulting in the formation of the modern relief with an average height of about 2 km. The dates of the last manifestations of suprasubduction magmatism in the region vary from 18.5 to 12.5 million years: 18.5–16.5 million years ago in Southern Armenia, 15.5 million years ago in Western Georgia, 13.0–12.5 million years ago in the Vardenis Plateau, and 15.0–12.5 million years ago in northeastern Turkey. The onset of post-collisional volcanism was recorded about 11–10 million years ago in Eastern Anatolia and 9.0–8.5 million years ago in the Lesser Caucasus. In Azerbaijan, the geodynamic structure is further complicated by the proximity of the Caspian Sea, located in a deep meridional depression. The northern part of the country is occupied by the eastern section of the southern wing of the Greater Caucasus with its intense deformation and complex geology. The southern regions are represented by the tectonically active systems of the Lesser Caucasus and the Talysh Mountains, each of which is characterized by unique structural, geodynamic and seismic features.

Research Methodology

Ambient seismic noise is predominantly formed by oceanic microseisms [Berger et al., 2004; McNamara, Buland, 2004], manifested in two frequency ranges: 0.05–0.10 Hz and 0.1–0.2 Hz. The main contribution to the noise is made by surface waves (Rayleigh and Love), which makes them the dominant component in the Green's functions obtained from cross-correlations. The dispersion properties of surface waves allow us to study the properties of the medium at different depths by analyzing different periods, which makes it possible to construct dispersion curves. These curves are used for tomographic inversion, where the surface wave velocities for each period serve as input data [Shapiro et al., 2005; Sabra et al., 2005].

Since the velocity of waves in the Earth's interior increases with depth, waves with a longer wavelength (lower frequency) are able to travel faster than waves with a shorter wavelength (higher frequency). The transmission velocity of seismic waves is determined by the density and elastic properties of the medium, as well as the nature of the wave itself. It tends to increase with depth in both the crust and mantle, but decreases sharply at the transition from the mantle to the outer core. For Rayleigh waves, velocities vary in the range of 1–5 km/s. Waves emanating from earthquakes in the crust or upper mantle exhibit higher velocities when passing through cold and dense regions and lower velocities when passing through hot rocks. Inversion of group velocities at the nodes of the computational grid allows one to create layered S-wave velocity profiles, which are

interpolated to construct two-dimensional maps. Since the amplitudes of surface waves significantly exceed those of body waves, the latter are often masked in seismic records, which complicates their processing and interpretation. The optimal approach to using surface waves to study subsurface structures is to calculate dispersion characteristics and then invert the obtained curves. Thus, constructing two-dimensional tomographic maps based on dispersion curves facilitates accurate reconstruction of the geological structure and study of the velocity characteristics of the region.

Ambient noise data processing includes four key stages: data pre-processing, cross-correlation, measurement of dispersion curves, and quality control. These methods are applicable at various scales, from regional to continental, and cover a wide range of periods. In this work, we used a standard technique for constructing Rayleigh wave dispersion curves based on seismic noise cross-correlation functions for pairs of stations. The procedure includes calculating daily cross-correlation functions, summing them over a long period (in this case, 10 years), filtering using narrow-band filters, determining time delays based on the maxima of the envelopes of the filtered functions, and calculating group velocities. To suppress earthquake signals, amplitude normalization based on a moving average was used. Data processing was performed according to the approach described by Bensen et al. [2007], taking into account the correction of instrumental distortions, time normalization to eliminate teleseismic events, and spectral cleaning. The dispersion curves of the Rayleigh wave group velocities for each source-receiver path were estimated using the `do_mft` package [Herrmann, 2013]. The figure 2 shows the cross-correlations for the IML and NAX stations.

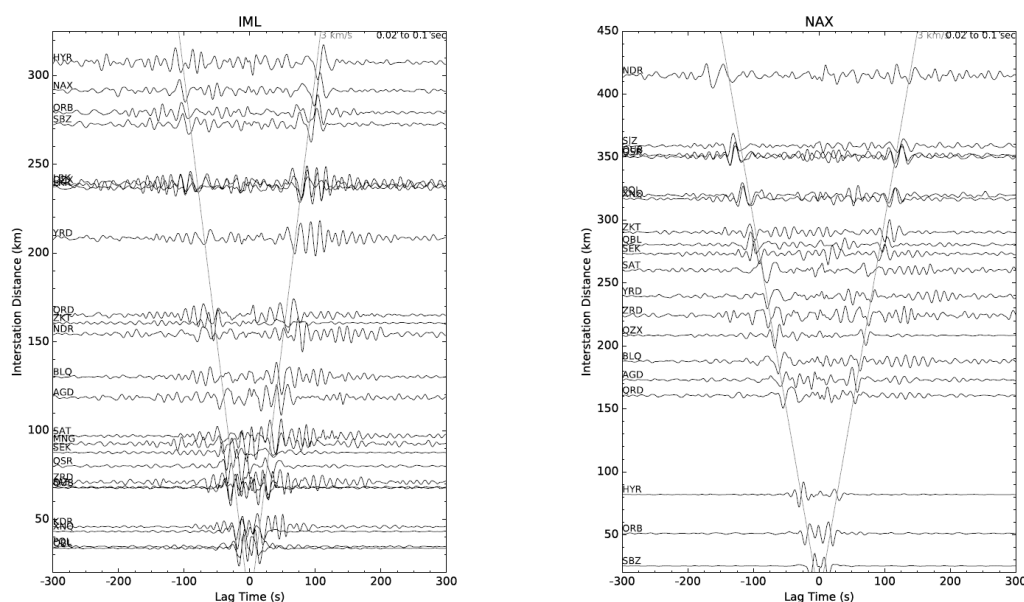


Fig. 2. Cross-correlations of ambient noise for the IML and NAX stations
(the location of the stations is shown in fig. 4)

Symmetrical correlations are obtained by convolution (adding the positive and negative components of the signal). Group and phase velocity measurements were made using time-frequency analysis with multiple filtering [Bensen et al., 2007; Levshin, Ritzwoller, 2001]. The cross-correlation functions were filtered with a series of narrow-band Gaussian filters with periods ranging from 5 to 75 s.

Group velocity measurements are made using an automated FTAN (Frequency-

Time Analysis) process. In this step, each step in the dispersion measurement process is decomposed, starting with the accumulation of cross-correlations to the application of time-frequency analysis. The process of obtaining group velocity is relatively simple and involves measuring the cross-correlation envelope and determining its peak for each frequency band.

Phase velocity curves are naturally obtained in the FTAN process, although the phase velocity measurement involves some subtle differences compared to the group velocity. The main difference is the need to carefully monitor the phase function $\phi(t, \omega_0)$, as it directly affects the phase velocity estimate. Figure 3 graphically illustrates the automated FTAN process. This process is shown for both group and phase velocity measurements, showing the flow from the initial waveform processing through the application of narrowband filters and the final group and phase velocity measurement.

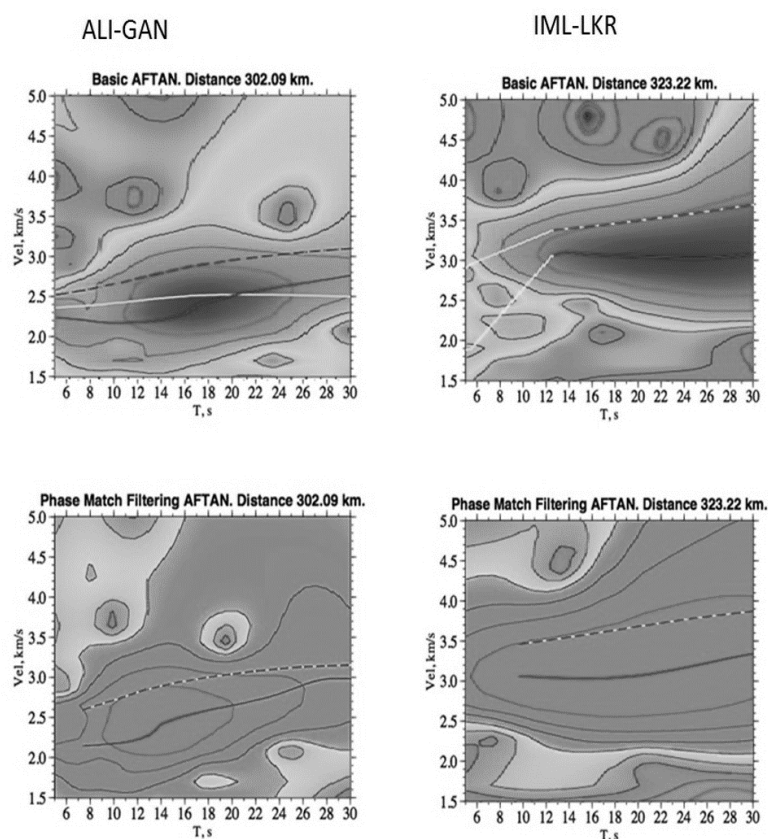
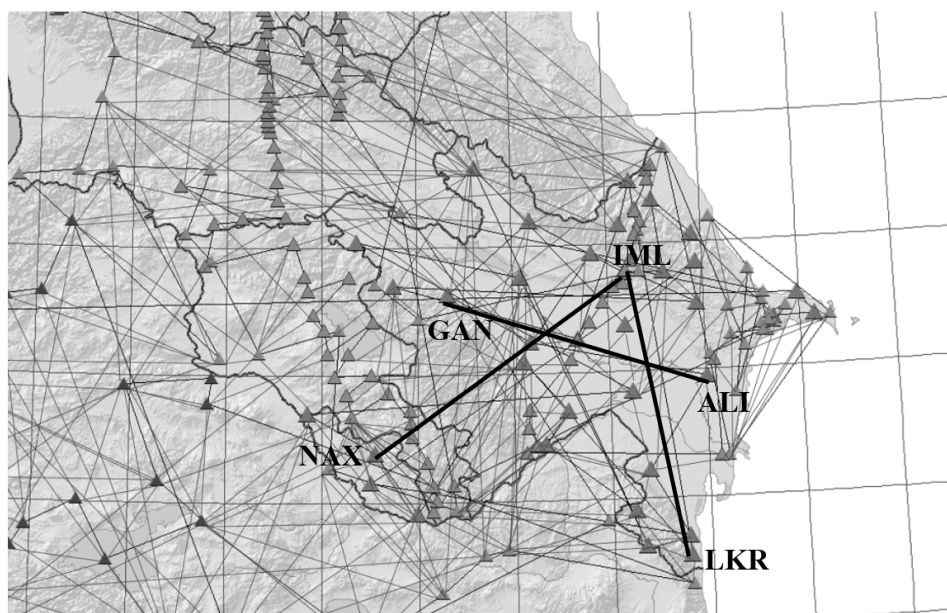


Fig. 3. Graphical representation of FTAN. 24-month stacked cross-correlation between stations ALI-GAN and IML-LKR (the location of the stations is shown in fig. 4)

Used data

In 2003, 35 permanent broadband stations were installed in Azerbaijan. Then, over the course of 20 years, new digital seismic stations were installed in the Caucasus and Turkey within the framework of various national networks (Azerbaijan, Georgia and Turkey), which provides an excellent opportunity to study the lithospheric structure. In these studies, we used data from 35 digital stations “Kinemetrix”, 22 stations installed within the framework of the CNECCA project, 17 stations installed within the CNET project, as well as data from Georgian and Turkish stations. (fig. 4).



▲ **Digital seismic stations**

Fig. 4. Network of digital seismic stations of Azerbaijan, Georgia, Turkey and scheme of station pairs used for tomographic analysis

Earthquakes that occurred in the Caucasus region in the period 2012–2024 were considered. Earthquake data for the period 2012–2021 were taken from the catalog considered in the articles [Bondar et al., 2024; Godoladze et al., 2024]. The figure 5 shows the maps of the epicenters of earthquakes with a magnitude greater than 3 presented in the form of four panels, each of which shows the distribution of epicenters depending on the depth of the foci. As can be seen in the figures, the main density of earthquakes is noted in the depth range of 5–35 km.

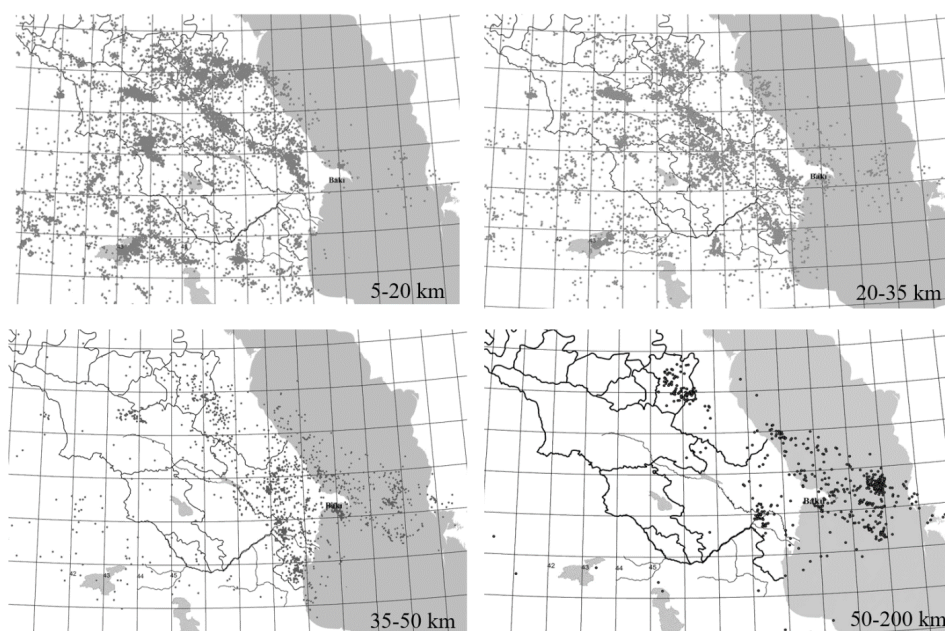


Fig. 5. Maps of earthquake epicenters for the period 2012–2024 at different depths

As a result, maps of the distribution of group velocities of Rayleigh waves were obtained within the study area, limited by longitude 44° – 52° E and by latitude 38° – 42.5° N. These maps, according to the method used, were calculated separately for each of the specified vibration periods. In total, 7 maps with a step variable by period were constructed in this way. Depth intervals of 20 km, 30 km, 40 km, 50 km, 100 km, 150 km and 200 km were considered (fig. 6).

Discussion of Results

The maps of group velocity variations obtained as a result of the studies indicate the presence of significant horizontal heterogeneities in the crust and mantle of the studied regions, which are revealed within the resolution of the method. These heterogeneities are expressed in zones with high velocity gradients corresponding to the boundaries of tectonically different structures, as well as in local anomalies of group velocities, manifested as maxima and minima. All maps presented in Fig. 3 show that the variations in group velocities range from -1.3% to $+1.3\%$ relative to the average velocity values for each vibration period. Although the configuration of the velocity variation isolines is complex, their distribution shows common characteristic features. Namely: increased values of velocities corresponding to depths of 20–30–40 km in the zone of the Lesser Caucasus, as well as a decrease in the values of velocities of 50–200 km, where the nature of the dispersion of surface waves is influenced mainly by the structural features of the mantle part of the lithosphere and the asthenosphere. Tectonically active structures, such as areas of intense mountain building in the Caucasus, manifest themselves as areas of reduced group velocities, i.e. the distribution features of horizontal velocity inhomogeneities in the mantle correspond with the geological structure of the region under consideration. For depths of 150–200 km, where the nature of the dispersion of surface wave velocities is influenced by the subasthenospheric layers of the upper mantle and lower mantle, such a connection is absent.

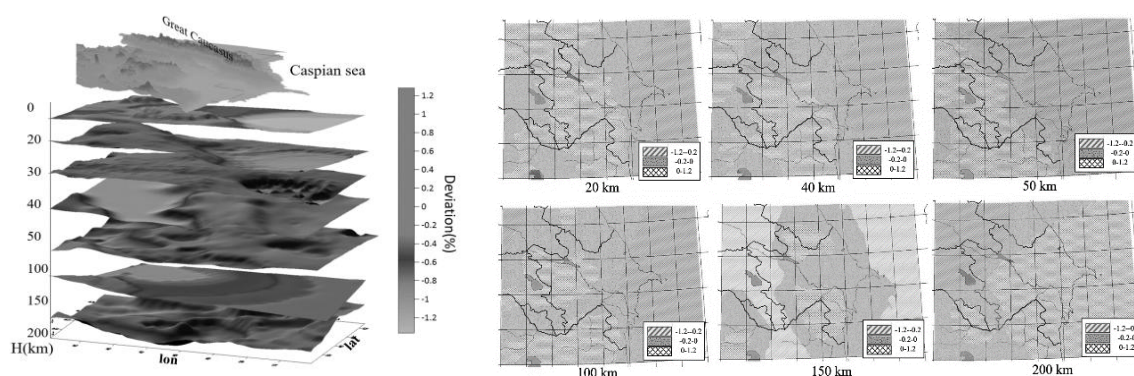


Fig. 6. Spatial sections of the distribution of group wave velocities in the Caucasus and Caspian sea regions by depth

Negative zones at a depth of 20–30 km prevail in the Caspian Sea, the Scythian Plate and the South Caspian Basin, the Alazani and Middle Kura Depressions. Negative deviations continue to dominate in the northeastern part of the region. The zone of positive changes increases, covering part of the Lesser Caucasus (0.8 – 1.2%). Taking into account the geological and tectonic structure of the region, it can be assumed that the reduced group velocities in the South Caspian, Kura and Alazani basins are due to the presence

of thick sedimentary layers (up to 20 km). At the same time, the low-velocity zone beneath volcanic complexes such as Elbrus, Kazbek and Ararat is probably associated with elevated volcanic rock temperatures or the presence of a shallow magma chamber. In contrast, high-velocity areas beneath volcanoes may be the result of low-temperature volcanic rocks or the location of a deeper magma source. In the Lesser Caucasus, there is some correlation between volcanic manifestations and low-velocity zones, but this relationship is less pronounced compared to the Greater Caucasus. Low velocities in northeastern Nakhichevan are explained by the presence of Upper Devonian and Permian deposits, which may be sources of oil.

The area of negative deviations narrows with depth. Positive changes are noticeably enhanced in the Kura Depression, Lesser Caucasus and Talysh. The central part of the region becomes the dominant zone of positive changes. The detected low-velocity anomalies in the Earth's crust may be caused by basaltic eruptions of the Quaternary period associated with Pliocene folding and tectonic activity of faults. It should also be noted that hot mantle material can penetrate into the Earth's crust through local displacements of the Moho boundary. Such intrusion results in thermal impact on the lower crust, causing its heating and, as a consequence, a decrease in seismic velocities in these horizons. Based on the obtained data, it can be assumed that the recorded low-velocity anomalies at depths of about 20–40 km are due to the combined effect of accretion, partial melting and erosion of the lower crust.

At a depth of 50–100 km, small areas of negative deviations remain in the northern part of the Caspian Sea. Positive values significantly expand. Positive deviations cover almost the entire South Caspian Basin, the Kura Depression and adjacent areas. The central and southern parts of the region demonstrate a steady increase in positive changes. High velocities in the lower crust of the South Caspian Basin compared to northwestern Iran are probably explained by the oceanic origin of the lower crust in this region.

At a depth of 150 km, positive values almost disappear, with the exception of small areas in the northern part of the Caspian Sea. Negative deviations become minimal. The dynamics show an increase in positive changes in the eastern and southern parts. At a depth of 200 km, the maximum positive deviations are observed in the South Caspian basin, the Kura depression, negative ones along the Lesser Caucasus and the Middle Kura depression. As is known, at depths greater than 100 km, the temperature reaches 1200 °C, which indicates the presence of hot molten material in the upper mantle. Low velocities are associated with pasty melt, and high ones are associated with metasomatic refertility of the upper mantle, increasing the density.

High velocity anomalies indicate the subduction of the South Caspian Basin under Talysh or the presence of a lithospheric root beneath the Kura Basin (fig. 7). In the eastern Greater Caucasus, deep earthquakes (100–200 km) indicate ongoing subduction there. On the rises of the Lesser Caucasus, Talysh, and Greater Caucasus, high and low velocity anomalies are noted at depths of 30–40 km and 50–100 km, respectively, which is interpreted as evidence of relative crustal thickening. High velocity anomalies are recorded in the Lesser Caucasus and northern Iran at a depth of 30 km, as well as in the Lesser and Greater Caucasus and northern Iran at a depth of 40 km. These anomalies may reflect the transition from warm-magmatic rocks to colder ones. Low velocity zones are likely related to the presence of sedimentary and Upper Paleozoic-Triassic metamorphic rocks in these geological supercomplexes.

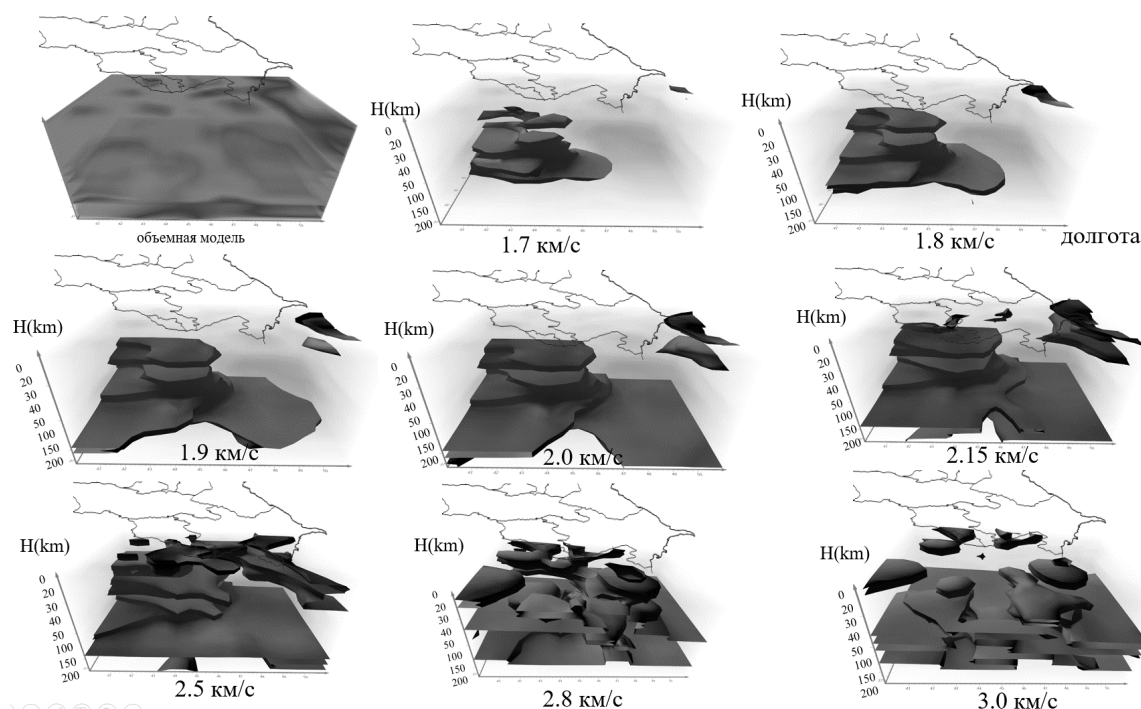


Fig. 7. 3D model of distribution of group velocities of 1.7- 3.0 km/s for the Caucasus region

At depths of about 150–200 km, the northern and western regions (western Greater Caucasus, Lesser Caucasus) show ultra-low velocities, while the eastern and southern regions (South Caspian Basin, Azerbaijan) show ultra-high velocities. This reflects the structure of the upper mantle, where low velocities are associated with a thin lithospheric mantle, and high velocities are associated with a stable mantle lid.

Conclusions

Maps of Rayleigh wave group velocity variations were constructed based on ambient seismic noise in the depth range of 20–200 km, which made it possible to characterize horizontal and vertical heterogeneities of the lithosphere of the Caucasus region.

Low-velocity anomalies were discovered in the South Caspian Basin, Kura and Alazani depressions, which are interpreted as zones of thick sedimentary strata and/or thermally weakened crust. Similar anomalies beneath the volcanoes of the Greater Caucasus (Elbrus, Kazbek, Ararat) indicate the possible presence of magmatic chambers or thermally modified crust.

High-velocity anomalies were revealed at depths of 30–40 km in the Lesser Caucasus zone and northern Iran, interpreted as thickened crust with the presence of dense metamorphic or igneous rocks. At depths of 50–200 km, an increase in positive velocity anomalies was found in the South Caspian Basin and the Kura Depression, which may be associated with the presence of a stable lithospheric mantle and, probably, the oceanic origin of the lower crust of the region.

Signs of subduction processes were recorded in the eastern part of the Greater Caucasus, as evidenced by deep-focus earthquakes (up to 200 km) and accompanying high-velocity anomalies in the mantle.

Ultra-low velocities were found in the upper mantle beneath the western part of the region (Lesser Caucasus, western Greater Caucasus) and ultra-high velocities were found

beneath the Eastern Caucasus and the South Caspian Basin, which reflects differences in the lithospheric structure: from heated asthenosphere to stable mantle with a lithospheric root. The high efficiency of using ambient seismic noise and FTAN analysis for reconstructing the three-dimensional structure of the lithosphere in seismically active regions, including automated extraction of dispersion curves and construction of tomographic models, has been confirmed.

References

1. Afanasenkov A.P., Nikishin A.M., Obukhov A.N. Geological structure and hydrocarbon potential of the Eastern Black Sea region. Moscow. Nauchniy Mir. 2007. 172 p. (In Russ.)
2. Aki K., Christoffersson A., Husebye E.S. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere. *Journal of Geophysical Research*. 1977. Vol. 82. Issue 2. pp. 277–296. DOI: 10.1029/JB082i002p00277.
3. Aki K., Lee W.H. Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes, 1. A homogenous initial model. *Journal of Geophysical Research*. 1976. Vol. 81. Issue 23. pp. 4381–4399. DOI: 10.1029/JB081i023p04381.
4. Bensen G.D., Ritwoller M.H., Barmin M.P., Levshin A.L., Lin F., Moschetti M.P., Shapiro N.M., Yang Y. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International*. 2007. Vol. 169. Issue 3. pp. 1239–1260. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x.
5. Berger J., Davis P., Ekström G. Ambient Earth noise: A survey of the global seismographic network. *Journal of Geophysical Research*. 2004. Vol. 109. Issue B11. DOI: 10.1029/2004JB003408.
6. Bondar I., Godoladze T., Cowgill E., Yetirmishli G., Myers S.C., Buzaladze A., Barbara Czece, Gök R., Onur T. Relocation of the Seismicity of the Caucasus Region. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2024. Vol. 114. Issue 2. pp. 857–872. DOI: 10.1785/0120230155.
7. Campillo M., Paul A. Long-range correlations in the diffuse seismic coda. *Science*. 2003. Vol. 299. Issue 5615. pp. 547–549. DOI: 10.1126/science.1078551.
8. Dilek Y., Imamverdiyev N., Altunkaynak Sh. Geochemistry and tectonics of Cenozoic volcanism in the Lesser Caucasus (Azerbaijan) and the peri-Arabian region: collision-induced mantle dynamics and its magmatic fingerprint. *International Geology Review*. 2010. Vol. 52. Issue 4–6. pp. 536–578. DOI: 10.1080/00206810903360422.
9. Dziewonski A.M., Hales A.L., Lapwood E.R. Parametrically simple Earth models consistent with geophysical data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1975. Vol. 10. Issue 1. pp. 12–48. DOI: 10.1016/0031-9201(75)90017-5.
10. Giorgobiani T.V. Stages, mechanism and geodynamics of formation of the folded system of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 1. pp. 35–42. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59063. (In Russ.)
11. Godoladze T., Gok R., Onur T., Gunia I., Dzmanashvili M., Boichenko G., Buzaladze A., Bondar I., Ratiani L., Rostomashvili T., Nabelek J., Javakhishvili Z., Yetirmishli G., Sandvol E., Kadiroglu F.T., Chiang A. Compilation of a comprehensive earthquake catalog and relocations in the Caucasus Region. *Seismological Research Letters*. 2024. Vol. 95(2A). pp. 1066–1081. DOI: 10.1785/0220230206.
12. Herrmann R. B. Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research. *Seismological Research Letters*. 2013. Vol. 84. No. 6. pp. 1081–1088. DOI: 10.1785/0220110096.
13. Ismail-Zadeh A., Adamia Sh., Chabukiani A., Chelidze T., Cloetingh S., Floyd M., Gorshkov A., Gvishiani A., Ismail-Zadeh T., Kaban M.K., Kadirov F., Karapetyan J., Kangarli T., Kiria J., Koulakov I., Mosar J., Mumladze T., Müller B., Sadradze N., Safarov R., Soloviev A. Geodynamics, Seismicity, and Seismic Hazards of the Caucasus. *Earth-Science Reviews*. 2020. Vol. 207. Art. No. 103222. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103222.

14. Kazimova S.E. Redefinition of Earthquake Hypocenters by the Double Difference Method. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 41–51. DOI: 10.46698/VNC.2020.36.81.003. (In Russ.)
15. Levshin A.L., Ritzwoller M.H. Automated detection, extraction, and measurement of regional surface waves. *Pure Applied Geophysics*. 2001. pp. 1531–1545. DOI: 10.1007/978-3-0348-8264-4_11.
16. Levshin A.L., Ritzwoller M.H. Automated detection, extraction, and measurement of regional surface waves. *Pure Applied Geophysics*. 2001. pp. 1531–1545. DOI: 10.1007/978-3-0348-8264-4_11.
17. Mammadli T.Ya., Muradov R.B. Tectonics of source zones of strong earthquakes in the south-eastern part of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 63–72. DOI: 10.46698/VNC.2023.99.42.005. (In Russ.)
18. McNamara D.E., Buland R.P. Ambient noise levels in the continental United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2004. Vol. 94. Issue 4. pp. 1517–1527. DOI: 10.1785/012003001.
19. Sabra K.G., Gerstoft P., Roux P., Kuperman W.A., Fehler M.C. Using ambient seismic noise for high-resolution surface wave tomography. *Geophysical Research Letters*. 2005. Vol. 32. Issue 14. L15306. DOI: 10.1029/2005GL023155.
20. Shapiro N.M., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M.H. High resolution surface wave tomography from ambient seismic noise. *Science*. 2005. Vol. 307. Issue 5715. pp. 1615–1618. DOI: 10.1126/science.1108339.
21. Snieder R. Extracting the Green's function from the correlation of coda waves. A tutorial. *Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31. Issue 13. L16301. DOI: 10.1103/PhysRevE.69.046610.
22. Stogny V.V., Stogny G.A., Ponomareva N.L. Seismotectonics of the southern part of the Greater Caucasus Central segment. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 76–96. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006. (In Russ.)
23. 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.)
24. 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.)
25. Wapenaar K. Retrieving the Elastodynamic Green's Function of an Arbitrary Inhomogeneous Medium by Cross Correlation. *Physical Review Letters*. 2004. Vol. 93. Issue 25. Art. No. 254301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.254301.
26. Wapenaar K., van der Neut J., Ruigrok E., Draganov D., Hunziker J., Slob E., Thorbecke J., Snieder R. Seismic interferometry by crosscorrelation and by multidimensional deconvolution: A systematic comparison. *Geophysical Journal International*. 2011. Vol. 185. Issue 3. pp. 1335–1364. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2011.05007.x.
27. Weaver R.L., Lobkis O.I. Ultrasonics without a source: Thermal fluctuation correlations at MHz frequencies. *Physical Review Letters*. 2001. Vol. 87. Issue 13. Art. No. 134301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.134301.
28. Yetirmishli G.J., Kazimov I.E. Modern GPS geodynamics of Azerbaijan. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 19–30. DOI: 10.46698/VNC.2022.35.95.002. (In Russ.)

УДК 624.131:550.343.4

DOI: 10.46698/VNC.2025.95.83.001

Оригинальная статья

Инженерно-геологические условия и оценка сейсмичности площадки строительства мечети в городе Аркадаге (Туркменистан)

Л.А. Агаева¹, Ё.Д. Мурадов², А.Б. Гаражаев², Х.Г. Эбердыев¹

¹ Научно-исследовательский институт Сейсмостойкого строительства
Министерства Строительства и архитектуры Туркменистана, Туркменистан,
744000, г. Ашхабад, ул. Бикрова, 178, e-mail: larisa.agaeva@mail.ru;

² Туркменский государственный архитектурно-строительный институт
Министерства образования Туркменистана, Туркменистан,
744025, г. Ашхабад, ул. Б. Аннанова, 136

Статья поступила: 23.05.2025, доработана: 28.07.2025, принята к публикации: 31.07.2025

Резюме: Актуальность работы. В работе рассматриваются инженерно-геологические и сейсмические условия площадки строительства мечети в г. Аркадаге. Для оценки расчетной сейсмичности этой площадки важно получить всесторонние данные о грунтовых условиях и сейсмических свойствах грунтов. На участке были проведены полевые изыскания – бурение скважин, динамическое и статическое зондирование. Инженерно-геологические изыскания на территории мечети до глубины 40 м, показали неоднородное строение грунтовой толщи (супеси, суглинки и пылеватые пески). Геофизические исследования на площадке строительства мечети в г. Аркадаге были проведены в 2023 г. Эти работы включали регистрацию сейсмического шума цифровым тремографом «TROMINO», установленным на грунте. Это позволило оценить скоростной разрез путём анализа спектрального отношения горизонтальной и вертикальной компонент (H/V) сейсмического шума (HVSR-анализ). Было также определено среднее значение скорости поперечной волны (V_s) до 30 м. **Цель исследования** – изучение инженерно-геологических условий и оценка расчетной сейсмичности территории строительства мечети в г. Аркадаге. **Метод исследований.** Расчетная сейсмичность площадки мечети была оценена на основе полученных данных о грунтовых и сейсмических условиях. Для определения локальных сейсмических свойств грунтов был применён современный метод. Геофизические работы выполнялись с использованием «TROMINO». Для каждой точки наблюдения с помощью программы моделирования скоростного разреза «Grilla» были определены скорости поперечных сейсмических волн (V_s) и резонансные частоты колебаний поверхностных отложений (до 30 м). **Результаты исследования.** Была определена локальная скорость поперечных сейсмических волн $V_s=225\text{--}263$ м/с. Полученные данные о сейсмических свойствах были использованы для оценки сейсмичности площадки строительства. Оценка расчетной сейсмичности была установлена на уровне 9,3 балла (исходная 9 баллов по НКСРТ-2017). Эта оценка стала основой для разработки мероприятий по обеспечению сейсмостойкости мечети в г. Аркадаге.

Ключевые слова: балл, грунтовые условия, расчетная сейсмичность, приращение балльности, сайт-эффект, тремограф, сейсмический шум.

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации Государственной Программы «Снижение сейсмического риска в сейсмоопасных зонах Туркменистана» на 2019–2030 годы МАКСАТНАМА №1061 от 23.01.2019 г.

Для цитирования: 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. 15(3): 37–52. DOI: 10.46698/VNC.2025.95.83.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.95.83.001

Original paper

Engineering-geological conditions and seismicity assessment of the construction site of a mosque in the city of Arkadag (Turkmenistan)

L.A. Agayeva¹, Yo.D. Myradov², A.B. Garajayev², H.G. Eyeberdiyev¹

¹ Research Institute of Earthquake Resistant Construction, Ministry of Construction and Architecture of Turkmenistan, 178 Bikrova Str., Ashgabat 744000, Turkmenistan, e-mail: larisa.agayeva@mail.ru;

² Turkmen State Architecture and Construction Institute, Ministry of Education of Turkmenistan, 136 B. Annanova Str., Ashgabat 744025, Turkmenistan

Received: 23.05.2025, revised: 28.07.2025, accepted: 31.07.2025

Abstract: Relevance. This study examines the engineering-geological and seismic conditions of the mosque construction site in Arkadag city. To assess the design seismicity of this site, it's crucial to obtain comprehensive data on ground conditions and seismic properties of soils. Field investigations were conducted at the site, including borehole drilling, dynamic and static probing. Engineering-geological surveys within the mosque territory, extending to a depth of 40 meters, revealed a heterogeneous structure of the soil stratum (sandy loams, loams, and silty sands). Geophysical surveys at the mosque construction site in Arkadag city were carried out in 2023. These works involved recording seismic noise with a digital "TROMINO" tromograph installed on the ground. This allowed for the assessment of the velocity profile by analyzing the spectral ratio of horizontal and vertical components (H/V) of seismic noise (HVSr analysis). The average shear wave velocity (V_s) down to 30 meters was also determined. **The aim of the research** is to investigate the engineering-geological conditions and assess the design seismicity of the mosque construction site in Arkadag city. **Method.** The design seismicity of the mosque site was evaluated based on the obtained data on ground and seismic conditions. A modern method was applied to determine the local seismic properties of soils. Geophysical works were performed using "TROMINO". For each observation point, shear seismic wave velocities (V_s) and resonant frequencies of surface deposits (up to 30m) were determined using the "Grilla" velocity profile modeling software. **Results.** A local shear seismic wave velocity of $V_s = 225\text{--}263$ m/s was determined. The obtained data on seismic properties were used to assess the seismicity of the construction site. The design seismicity was established at 9.3 intensity points (the initial value was 9 points according to NSZMT-2017). This assessment became the basis for developing measures to ensure the seismic resistance of the mosque in Arkadag city.

Keywords: intensity point, soil conditions, estimated seismicity, intensity increase, site effect, tromograph, seismic noise.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the implementation of the State Program "Reduction of Seismic Risk in Seismic Zones of Turkmenistan" for 2019–2030 PROGRAM No. 1061 dated 01/23/2019.

For citation: 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). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 37–52. DOI: 10.46698/VNC.2025.95.83.001

Введение

Известно, что уязвимость зданий и сооружений к колебаниям грунта, возникающим при землетрясении, можно оценить по данным анализа записи природных микросейсмических колебаний (микросейсм), обычно так называемым «белым шумом». Это доказано результатами метода определения локальных сейсмических свойств грунтов на территории города Аркадага, с использованием прибора для регистрации сейсмического шума – цифрового тремографа “TROMINO” (производство “Micromed S.P.A.”, Италия) [Абасеев и др., 2014].

Результаты геофизических работ включают в себя оценку скоростного разреза по спектральному отношению горизонтальной и вертикальной компонент (H/V) сейсмического шума (HVSR-анализ) и определение среднего значения скорости распространения поперечной сейсмической волны в верхней части геологического разреза от поверхности до глубины 30 метров ($V_s(0-30\text{ m})$). Оценка сейсмических свойств грунтов предполагает изучение локальных резонансных явлений в осадочных породах, обычно называемых «сайт-эффектом», т.к. проявление резонанса может привести к существенному изменению интенсивности колебательно-го процесса в диапазоне частот от 0,3 Гц до 15 Гц. Функция «сайт-эффекта» при небольших напряжениях может быть определена как спектральное отношение горизонтальной и вертикальной компонент (H/V) движения грунта. Полагается, что на величину вертикальной компоненты фонового сейсмического шума не влияют особенности поверхностных слоев, представленных рыхлыми неустойчивыми породами [Tokeshi et al., 2013]. Обычно для изучения скоростного разреза грунтов по сдвиговой S-волне используют трудоёмкие сейсмические методы, применяя искусственные источники возбуждения поперечных сейсмических волн. По записям прибора “TROMINO”, регистрирующего естественный фон помех, можно определить различные сейсмические параметры грунтов площадки объекта [Parolai et al., 2010; Абасеев, Хыдыркулиева, 2023].

В верхней части геологического разреза – в зоне малых скоростей происходит изменение энергии сейсмических волн, что в конечном итоге определяет интенсивность проявления землетрясения на поверхности и служит основанием для необходимости оценок расчетной сейсмичности площадок строительства объектов различного назначения [Агаева, 2022, 2024; Заалишвили и др., 2024а, б; Чернов, 2024].

Методика и данные

В административном отношении площадка строительства мечети расположена в северо-восточной части г. Аркадага. Возведение объекта уже идет и сдача в эксплуатацию состоится в декабре 2025 года. С учётом технических характеристик и конструктивных особенностей здания мечети, сложности грунтовых условий территории были предусмотрены и выполнены инженерно-геологические и геофизические исследования площадки под объектом строительства. Для определения оценки расчетной сейсмичности площадки строительства мечети в г. Аркадаге сначала были изучены инженерно-геологические условия, а затем – сейсмические условия [Эсенов, 1994].

В процессе инженерно-геологических изысканий были изучены геологическое строение, гидрогеологические условия, были определены физико-механические и коррозионные свойства грунтов, а также были выделены инженерно-геологические элементы (ИГЭ). Кроме бурения скважин было проведено испытание грунта мето-

дами статического зондирования (CPT) и динамического зондирования (стандартной пенетрации – SPT) в районе расположения мечети. Эти работы проводились со дна разработанных котлованов под 4 минарета. Зондирование производилось на отметке фактического дна котлована каждого минарета, абсолютные отметки поверхности земли каждого из 4-х котлованов составляют 215,00 м.

Геофизические исследования на площадке строительства мечети в г. Аркадаге проводили летом 2023 года. Эти работы включали в себя:

1. Регистрацию тромографом «TROMINO» на грунте для оценки скоростного разреза по спектральному отношению горизонтальной и вертикальной компонент (H/V) сейсмического шума (HVSР-анализ).

2. Определение среднего значения скорости поперечной волны (V_s) в верхней толще разреза от поверхности до глубины 30 метров ($V_s(0.0–30.0\text{ м})$).

Затем на основе полученных данных изучения грунтовых и сейсмических условий была проведена оценка расчетной сейсмичности территории площадки строительства мечети в г. Аркадаге.

Результаты и обсуждение

Полевые работы были выполнены буровой бригадой НИИ Сейсмостойкого строительства МСиАТ в июне–июле 2023 г. Всего на территории строительства мечети было пробурено 15 скважин глубиной от 20 м до 40 метров (рис. 1).

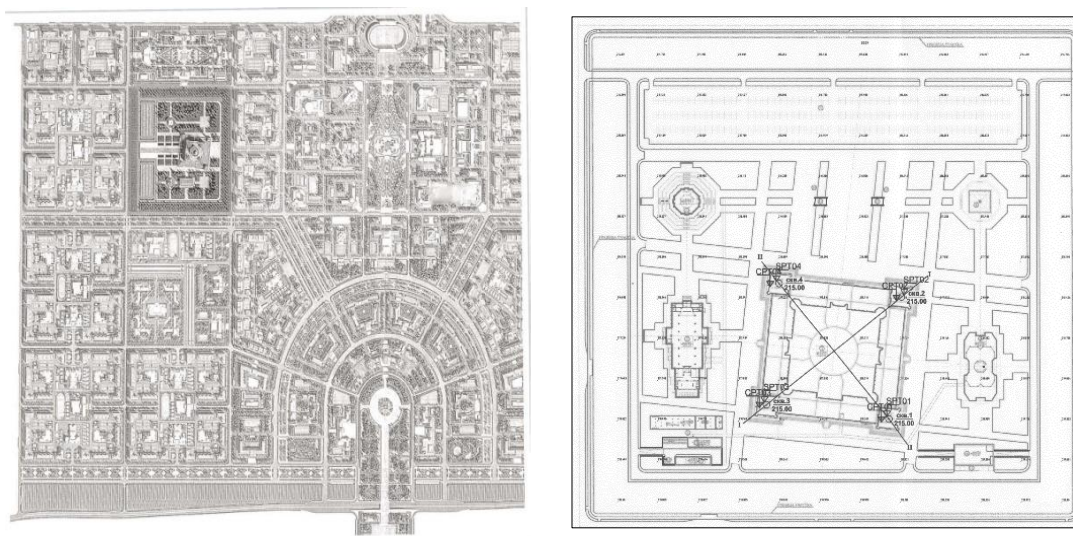


Рис. 1. Месторасположение мечети и пункты геофизических изысканий и точек статического и динамического зондирования на площадке строительства /

Fig. 1. Location of the mosque and geophysical survey points and points of static and dynamic probing at the construction site

Статическое зондирование (CPT) выявило изменчивость плотности сложения грунтов по глубине и позволило получить путем расчета по эмпирическим зависимостям характеристики плотности, прочности, сжимаемости в их природном залегании. Статическое зондирование на площадке мечети было выполнено летом 2023 года аппаратурой «ТЕСТ – K2M».

Динамическое зондирование (SPT) использовалось для оценки положения границ между слоями грунта различного состава и состояния, степени однородности

грунтов и как косвенный метод для получения характеристик вскрытого грунта. Динамическое зондирование проводилось путем забивания в грунты зонда и с одновременным измерением через заданные интервалы по глубине значений сопротивления грунтов под наконечником. В результате полевых испытаний грунтов динамическим зондированием определялось динамическое сопротивление грунта (кгс/см^2) погружению зонда. Результаты динамического зондирования показаны осадкой зонда от определенного числа ударов, количеством ударов, которое необходимо для погружения зонда на определенную глубину, и в виде динамического сопротивления грунта погружению конического наконечника (в МПа). Динамическое зондирование летом 2023 года проводилось установкой «СОНДАЖ» (производство Турция).

Отбор проб грунта естественной плотности и влажности для проведения полного комплекса определения физических свойств осуществлялся грунтоносом [Ананьев и др., 2021]. При вскрытии горизонта грунтовых вод отмечались глубины залегания установившегося уровня и отбирались пробы грунтовой воды на химический анализ.

Лабораторные исследования грунтов были проведены в соответствии с действующими на территории Туркменистана стандартами и методическими указаниями. В лаборатории НИИ Сейсмостойкого строительства МСиАТ летом 2023 г. были исследованы фракционный (гранулометрический) состав грунтов, химический состав засоления по водным вытяжкам, испытаны образцы грунтов природной структуры, оценены плотность сложения грунтов, степень водонасыщения, а также характеристики сжимаемости и прочности.

При камеральной обработке материалы полевых работ и лабораторных исследований систематизировались, выделялись инженерно-геологические элементы и устанавливались границы их распространения, вычислялись и назначались нормативные, расчетные значения характеристик грунтов выделенных ИГЭ, определялись агрессивность грунтов и грунтовых вод к бетонным и железобетонным конструкциям, степень коррозионной активности к металлам, а также уточнялась расчетная сейсмичность площадки мечети.

Лабораторные работы были выполнены в стационарной инженерно-геологической лаборатории НИИ СС МСиАТ в августе 2023 года.

В геоморфологическом отношении территория г. Аркадага приурочена к предгорной пролювиальной равнине Центрального Копетдага, к центральной части Алтыябского конуса выноса [Агаева, 2024]. Естественный морфологический облик равнины в настоящее время изменен влиянием орошения и освоения земель и представлен характерным ирригационно-хозяйственным ландшафтом. Рельеф территории участка мечети спокойный, полого-равнинный. Имеется общий уклон поверхности в северо-восточном направлении. Тип рельефа эрозионно-аккумулятивный. Абсолютные отметки поверхности земли (по устьям пробуренных 15-ти скважин) изменяются в интервале от 215,98 м до 219,25 м. Перепад высотных отметок поверхности земли составляет 3,27 м.

В геологическом строении территории площадки мечети до глубины 20,0–40,0 м принимает участие толща верхнечетвертично-современных пролювиальных отложений (рIII-IV) предгорной равнины Центрального Копетдага. Литологически эти отложения представлены песками, супесями и суглинками [Агаева, 2022].

Для детального расчленения инженерно-геологического разреза, определения нормативных и расчетных характеристик грунтов на участке мечети были выполнены 4 теста на проникновение конуса (СРТ). Для выполнения тестов СРТ была использована аппаратура для статического зондирования грунтов «ТЕСТ-К2М» с применением зонда 2-го типа. Регистрирующий, двухканальный измерительный прибор «ТЕСТ-К2М» предназначен для преобразования баланса тензометрических полумостов зонда в цифровые значения, хранения результатов тестирования и передачи на персональный компьютер для последующей обработки.

Метод динамического зондирования (SPT) используется для оценки положения границ между слоями грунта различного состава и состояния, степени однородности грунтов и как косвенный метод для получения характеристик грунта. На участке строительства мечети вскрыты серовато-коричневые песчаные и глинистые грунты на верхних поверхностях и грунты, которые твердеют с увеличением глубины. Плотность связных грунтов и относительная плотность несвязных грунтов определялись путем проведения стандартного испытания на проникновение (SPT) через каждые 1,5 метра. В целях определения слоев грунта, пройденных в скважинах и определения их консистенции и прочности, были проведены стандартные испытания на проникновение (SPT), через стандартные промежутки времени и были взяты образцы. Испытания выполнялись буровым станком «СОНДАЖ». Стандартные испытания на проникновение проводились путем удара молотом массой 63,5 кг с высоты 75 см и подсчета количества ударов (N), необходимых для проникновения каждой 15-сантиметровой части стержня диаметром 2 дюйма. Количество ударов, насчитанных за первую часть (от 0 до 15 см) не учитывается. При оценке учитывается общее количество ударов, необходимых для проникновения средней (15 см–30 см) и конечной части (30 см–45 см) – N30. Согласно данным, полученным в результате бурения, было установлено, что в среднем до глубины 30–40 метров залегают слабые, водонасыщенные пылеватые и глинистые грунты и текучие супеси, ниже с глубины 12,0–14,0 м залегают плотные и очень плотные пески пылеватые, пластичные супеси, с показателями N=24–46 ударов, далее, с глубины 14,0–16,0 м (SPT-1 и SPT-2) – 22,0 м (SPT-3 и SPT-4) залегают плотные грунты со значением N>50 ударов.

Анализ материалов инженерно-геологических изысканий, полученных непосредственно на площадке мечети, позволяет выделить 7 (семь) инженерно-геологических элементов (ИГЭ) по критериям различия физико-механических свойств, состава, состояния и номенклатурного вида (рис. 2). Основными составляющими грунтовой толщи основания мечети являются пролювиальные верхнечетвертично-современные отложения:

– ИГЭ-1 – суглинок легкий, желто-серого, серого и коричнево-серого цвета, мягкопластичной консистенции. Вскрыт повсеместно в скважинах №1 и №2 в интервалах от 0,0–0,8 м до 6,5–8,2 м; мощность слоя от 5,7 м до 8,2 м; и в скважине №1 в интервале от 10,0 м до 12,7 м, мощность слоя 2,7 м;

– ИГЭ-2 – супесь легкая, серо-коричневого и светло-коричневого цвета, пластичной консистенции. Вскрыт на участке скважины №1 в интервале от 8,2 м до 10,0 м, мощность слоя 1,8 м; в скважине №2 в интервале от 0,0 до 0,8 м, мощность слоя 0,8 м; в скважине № 3 в интервале 8,2–10,0 м, мощность 0,8 м;

– ИГЭ-3 – песок пылеватый от желтовато-серого до коричнево-серого цвета, слюдистый, средней плотности, насыщенный водой, с прослойками супеси до 5–15 см в различных интервалах. Вскрыт на участке повсеместно в различных интервалах глубин – в скважине №1 в интервале от 12,7 м до 14,3 м, мощность слоя 1,6 м; в скважине №2 в интервале от 6,5 м до 15,5 м, мощность 9,0 м; в скважине №3 в интервале 10,0–11,1 м, мощность 1,1 м;

– ИГЭ-4 – песок пылеватый, от желтовато-серого до желтовато-коричневого цвета, плотный, насыщенный водой. Вскрыт на участке повсеместно в различных интервалах глубин – в скважине №1 в интервалах от 14,3 м до 15,5 м, мощность слоя 1,2 м, от 17,9 м до 22,1 м, мощность слоя 4,2 м и от 23,7 м до 28,0 м, мощность 4,3 м; в скважине №2 в интервале от 17,8 м до 21,6 м, мощность 3,8 м; в скважине №3 в интервале 23,0–25,2 м, мощность 2,2 м;

– ИГЭ-5 – супесь легкая, светло-коричневого цвета, пластичной консистенции, с включением гравия до 25%. Вскрыт в интервалах глубин – скважина №1 в интервалах от 15,5 м до 17,9 м, мощность слоя от 2,4 м и от 22,1 м до 23,7 м; в скважине №3 в интервале от 15,8 м до 23,0 м, мощность 7,2 м;

– ИГЭ-6 – супесь легкая и тяжелая, гравелистая, коричневого цвета, пластичной консистенции $И < 0.5$. Вскрыт на участке повсеместно в интервале от 25,2–28,0 м до 35,0 м, вскрытая мощность слоя от 7,0 м до 9,8 м;

– ИГЭ-7 – супесь легкая и тяжелая, желтовато-серого цвета, текучей консистенции, в кровле – пластичная. Вскрыт на участке в скважине №3 в интервале от 0,0 до 5,5 м, мощность слоя 5,5 м и от 7,0 м до 8,2 м.

Вскрытые грунты ИГЭ-2–ИГЭ-7 площадки мечети – непросадочные по данным компрессионных испытаний. Грунты ИГЭ-1 – просадочные. Мощность просадочной толщи составляет от 2,9 м до 3,5 м. Просадка грунта ИГЭ-1 от собственного веса отсутствует, но возможна от внешней дополнительной нагрузки. Тип грунтовых условий по просадочности – I (менее 5 см). Характеристики просадочных свойств грунтов – начальное просадочное давление грунтов от 0,070 МПа до 0,160 МПа, начальная просадочная влажность 17%–21,4%. Грунты площадки мечети по степени засоленности для оценки агрессивности к бетонам и железобетонам, в соответствии с табл. В.12 TDS-609-2003 – незасоленные (содержание сульфатов в пересчете на $SO_4 = 0,0288\%–0,1032\%$, хлоридов в пересчете на $Cl^- = 0,0077\%–0,0175\%$). Грунты площадки мечети согласно СНТ 2.03.11–2023 «Защита строительных конструкций от коррозии» к бетону марки по водонепроницаемости W4, W6 и W8: – на портландцементе – от неагрессивных до слабоагрессивных; – на портландцементе с добавками и шлакопортландцементе – неагрессивные; – на сульфатостойких цементах – от неагрессивных до слабоагрессивных.

Степень агрессивного воздействия грунтов на конструкции из углеродистой стали выше и ниже уровня грунтовых вод – среднеагрессивная. Коррозионная агрессивность вскрытых грунтов по отношению к углеродистой и низколегированной стали в зависимости от их удельного электрического сопротивления ($\rho = 91,06–125,60 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) – низкая. Коррозионная агрессивность грунтов по отношению к свинцовой оболочке кабеля – средняя, к алюминиевой – высокая [Агаева, 2024].

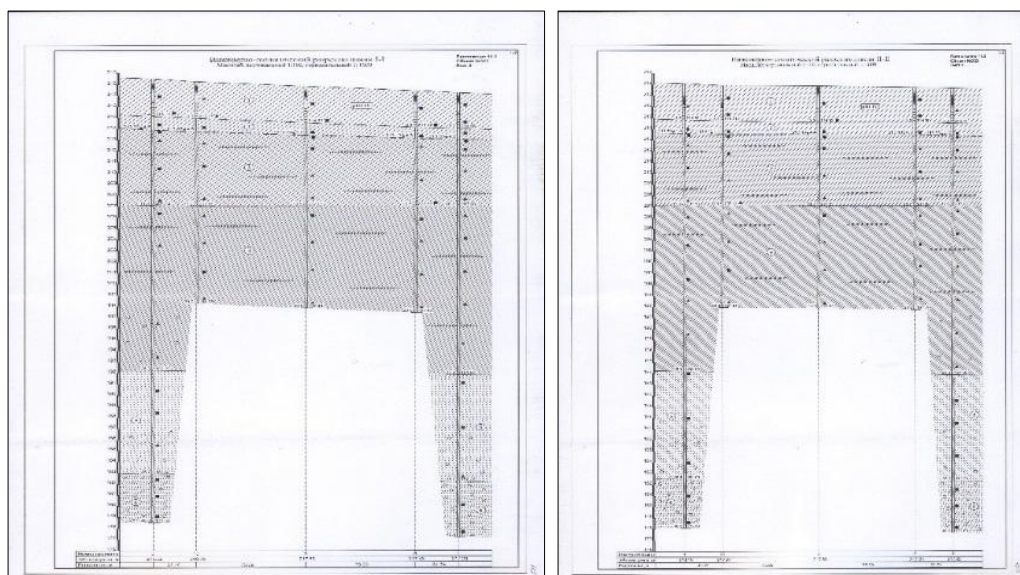


Рис. 2. Инженерно-геологические разрезы I-I (скважины №3,13,9,5,1) и II-II (скважины №4,11,9,7,2) /

Fig. 2. Engineering-geological sections I-I (wells №3,13,9,5,1) and II-II (wells No.4,11,9,7,2)

Гидрогеологические условия территории г. Аркадага характеризуются наличием единого неоген-четвертичного водоносного комплекса, с повсеместным неглубоким залеганием безнапорных подземных вод, приуроченного к пролювиальным отложениям предгорной равнины Центрального Копетдага. В гидрогеологическом отношении г. Аркадаг входит в состав Каракумского артезианского бассейна. Первым от поверхности выделяется водоносный горизонт верхнечетвертично-современных аллювиально-пролювиальных отложений мощностью 20–40 м и более. Водовмещающие породы комплекса представлены песками пылеватыми и мелкими, супесями и суглинками, с прослоями и линзами глин [Эсенов, Ходжаев, 1996]. Основное питание подземных вод г. Аркадага осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков и поливных вод и за счет притока грунтовых вод со стороны горного массива Копетдаг, фильтрационных потерь из Гарагум-реки, коллекторно-дренажной сети, в меньшей степени – инфильтрации атмосферных осадков. Зафиксированный УГВ на площадке мечети соответствует минимальному [Агаева, 2024].

Грунтовые воды на участке строительства минаретов в период полевых изысканий (июнь 2023 г.) вскрыты на глубинах от 10,0 м (скважина №3) до 10,5 м (скважина №14) от поверхности дна котлована, что соответствует абсолютным отметкам от 213,50 м до 214,0 м. Уклон грунтового потока соответствует уклону рельефа. По результатам химических анализов вскрытые грунтовые воды площадки мечети по степени минерализации – слабосоленоватые (сухой остаток 1,6600 г/л–2,5200 г/л), а по химическому составу они сульфатно-калиево-магниевые. Грунтовые воды площадки – среднеагрессивные и сильноагрессивные к бетону марки по водонепроницаемости W4, на портландцементе, неагрессивные к бетону на портландцементе с нормированными добавками и шлакопортландцементе, неагрессивные к бетону на сульфатостойком цементе; слабоагрессивные к бетону марки по водонепроницаемости W6 и W8, на портландцементе, неагрессивные к бетону на портландцементе с нормированными добавками и шлакопортландцементе, неагрессивные к бетону на сульфатостойком цементе.

Территория участка земли, отведенная под строительство г. Аркадага располагается над Алтыябским конусом выноса пресных подземных вод [Эсенов, 2018]. Согласно фондовым архивным материалам этот водоносный комплекс мощностью около 40 метров залегает на глубине от 30 м до 70 м [Агаева, 2024].

По инженерным изысканиям, выполненным на территории расположения мечети в г. Аркадаге инженерно-геологические и гидрогеологические условия строительства мечети сложные и не совсем благоприятные как в сейсмическом, так и в строительном отношениях.

Инженерно-геофизические исследования на площадке мечети в г. Аркадаге проводились летом 2023 года. Эти исследования включали в себя:

1. Регистрацию тромографом “TROMINO” (рис. 3) на грунте для оценки скоростного разреза по спектральному отношению горизонтальной и вертикальной компонент (H/V) сейсмического шума (HVSР-анализ – рис. 4).

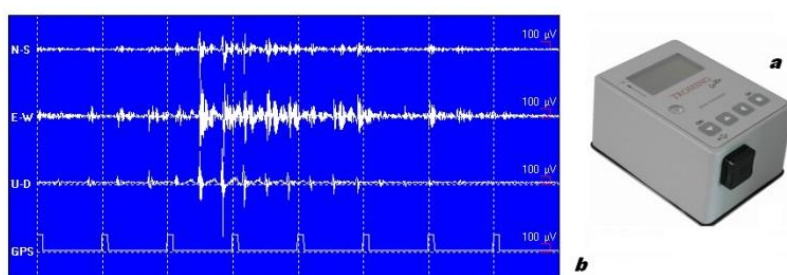


Рис. 3. Внешний вид цифрового тромографа “TROMINO” (a) и запись сейсмического шума на площадке строительства мечети (b) /

Fig. 3. Appearance of the digital tromograph “TROMINO” (a) and recording of seismic noise at the mosque construction site (b)

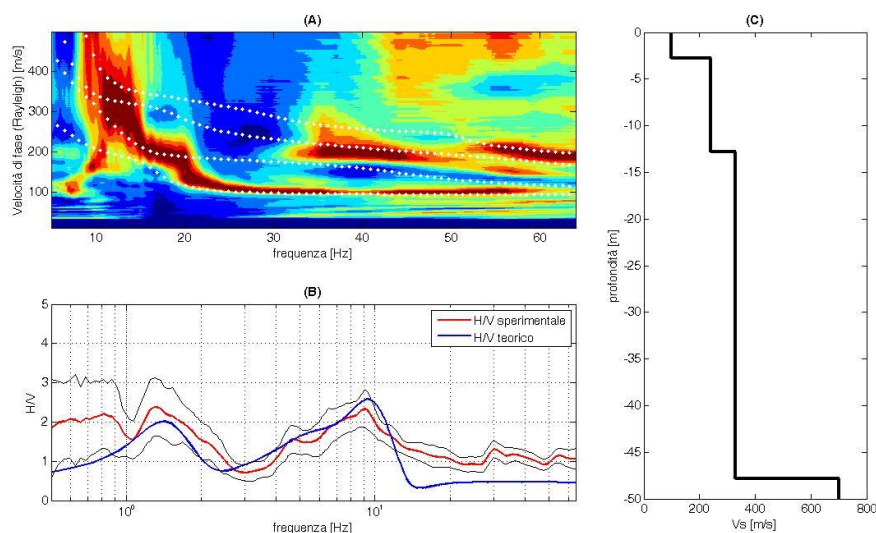


Рис. 4. Результаты HVSР-анализа по данным регистрации сейсмических шумов /

Fig. 4. Results of HVSР analysis based on seismic noise recording data

2. Определение среднего значения скорости поперечной волны (V_s) в верхней толще разреза от поверхности до глубины 30 метров ($V_s(0.0-30.0 \text{ м})$).

Оценка сейсмических свойств грунтов предполагает изучение локальных резонансных явлений в осадочных породах, обычно называемых «сайт-эффектом» [Pilz

et al., 2014], так как проявление резонанса может привести к существенному изменению интенсивности колебательного процесса в диапазоне частот от 0,3 Гц до 15,0 Гц. Функция «сайт-эффекта» при небольших напряжениях может быть определена как спектральное отношение горизонтальной и вертикальной компонент (H/V) движения грунта. На величину вертикальной компоненты фонового сейсмического шума не влияют особенности поверхностных слоев верхней части разреза, представленных рыхлыми неустойчивыми породами [Ядигаров и др., 2023; Zaslavsky et al., 2010].

Записи сейсмического («белого») шума были получены на 8-ми точках на территории строительной площадки мечети. Обработка и анализ данных были осуществлены ПО “Grilla” к “TROMINO”. Оно включает в себя программы для построения синтетических кривых H/V, основанные на моделировании поверхностных волн (Рэлея и Лява) в области плоско-параллельных многослойных систем. Применяя программу моделирования скоростного разреза “Grilla”, можно подобрать и совместить H/V теоретическую (синтетическую) кривую с экспериментальной кривой, построенной по измеренным данным (рис. 5). График функции HVSR-анализа вычисляется как средние значения спектров горизонтальных компонент, делённых на спектр вертикальной составляющей сейсмического шума H/V и в разрезе выделяются слои различной мощности, отражающие на кривой H/V соответствующие пики и локальные минимумы и максимумы [Castellaro, Mulargia, 2009; Mokhberi, 2015].

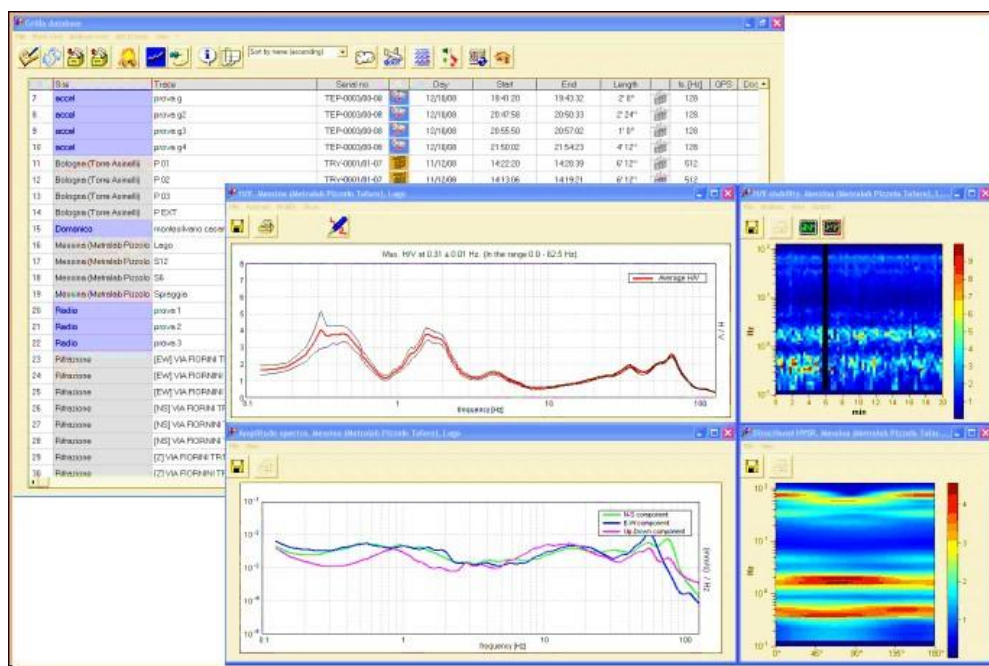


Рис. 5. Инструмент прямого моделирования H/V на основе поверхностных волн (Рэлея и Лява);
Модуль для спектрального и H/V анализа /

Fig. 5. Direct H/V modeling tool based on surface waves (Releyna and Lyava);
Module for spectral and H/V analysis

По результатам HVSR-анализа по строительной площадке мечети были сделаны следующие выводы:

1. При анализе полученных данных в пунктах регистрации №1–№8 выделены по 4 пика.

2. Выделена первая поверхностная аномалия на частоте 50,85–67,30 Гц и она связана с первым от поверхности супесчаным слоем мощностью до 0,37–0,47 метра и ей можно пренебречь. Вторая аномалия на частоте 9,04–14,23 Гц связана с уровнем грунтовых вод и песчаными отложениями в водонасыщенном состоянии на глубинах от 2,97 м до 6,20 м. Третья аномалия связана с разнородностью песков или прослоями супесчано-суглинистых грунтов на глубинах от 18,0 м до 25,5 м.

3. На всех площадках на частоте от 1,04 Гц до 1,48 Гц выделяется пик фундаментальной частоты колебаний – на точке №1 – 3,12; на точке №2 – 2,49; на точке №3 – 4,08; на точке №4 – 3,56; на точке №5 – 3,21; на точке №6 – 3,21; на точке №7 – 3,21; на точке №8 – 2,35. Этот пик связан с коренными плотными отложениями, которые залегают по данным HVSR-анализа в интервале глубин от 44,12 м до 58,97 м.

Эти аномалии при определенных условиях могут привести к проявлению «сайт-эффекта», т.е. усилению колебаний грунта при землетрясениях на исследуемой площадке мечети. На основе проведенного анализа результатов наблюдений была построена обобщенная многослойная Vs-модель предполагаемого разреза грунтов исследуемой площадки мечети с помощью программы “Grilla” [Хыдыркулиева, 2023].

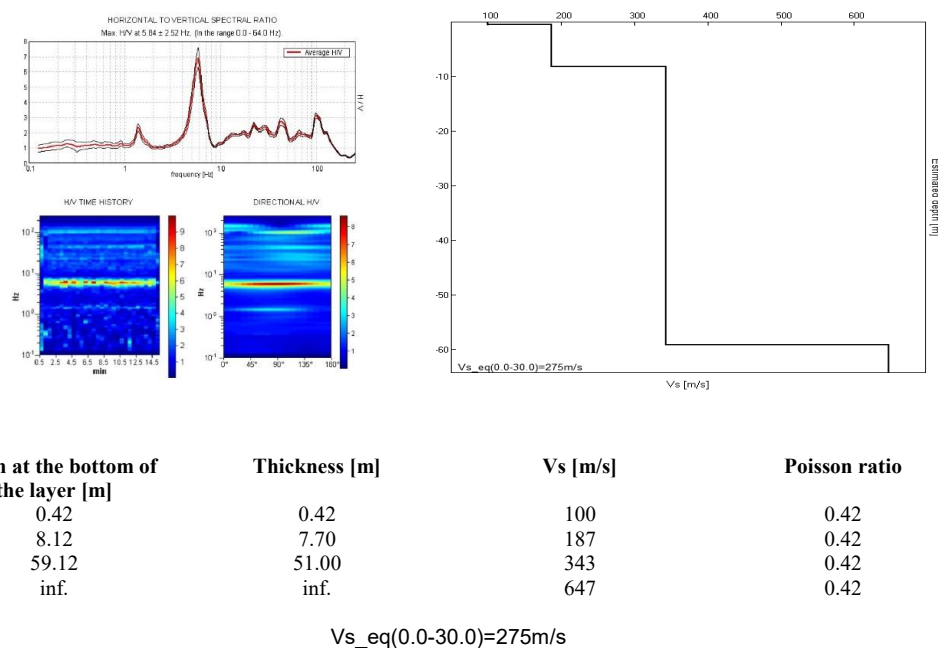


Рис. 6. Результаты расчётов в точке №1 в районе скважины №5 /

Fig. 6. Calculation results at point №1 in the area of well №5

4. Были вычислены средние значения скорости поперечных волн Vs (0–30 м) верхней толщи разреза от поверхности до глубины 30 метров:

- Vs(0–30 м) (1) =275 м/с в районе скв. №5 (рис. 6);
- Vs(0–30 м) (2) =263 м/с в районе скв. №4;
- Vs(0–30 м) (3) =242 м/с в районе скв. №15;
- Vs(0–30 м) (4) =239 м/с в районе скв. №2;
- Vs(0–30 м) (5) =225 м/с в районе скв. №7;
- Vs(0–30 м) (6) =246 м/с в районе скв. №13;
- Vs(0–30 м) (7) =235 м/с в районе скв. №12;
- Vs(0–30 м) (8) =247 м/с в районе скв. №11.

5. Выделена фундаментальная частота 1,04–1,48 Гц колебаний грунта, связанная с водонасыщенными песчаными грунтами и неоднородностью природной плотности грунтов, которая при определенных условиях может привести к проявлению «сайт-эффекта», а также выделена амплитуда колебаний грунта на частоте от 9,04 Гц до 14,23 Гц.

Главным фактором, осложняющим инженерно-геологические условия и определяющим проектные решения строительства мечети, является высокая сейсмичность территории и вытекающая отсюда сейсмическая опасность. Исходная сейсмичность города Аркадага согласно Национальной карте общего сейсмического районирования территории Туркменистана (НКСРТ-2017) составляет 9 баллов по шкале MSK-64 [Абасеев, 2017; Эсенов, 2018].

Сейсмологическими исследованиями на площадке мечети тромографом «TROMINO» (по данным ИСиФА АНТ) определена скорость поперечных сейсмических волн в неоднородной толще 0–30,0 м, которая составила $V_s=225\text{--}263\text{ м/с}$. Приращение сейсмической интенсивности обусловленное на момент изысканий за счет пониженной сейсмической жесткости неоднородной грунтовой толщи, содержащей высокопористые просадочные грунты (ИГЭ-1), определяется по формуле С.В. Медведева [Медведев, 1962; Агаева, 2024]:

$$I_{ж} = 1,67 \cdot \lg \frac{v_s \rho_s}{v_n \rho_n}, \quad (1)$$

где: $V_s=400\text{ м/с}$ – скорость поперечной сейсмической волны в грунтах площадки-эталона (по данным Центральной сейсмостанции «Ашхабад», поселок Берзенги [Ходжаев, 2011; Хыдыркулиева, 2023]);

V_n – от 225 до 263 м/с – скорость поперечной сейсмической волны в грунтах площадки объекта (по материалам сейсмического микрорайонирования территории города Ашхабада [Эсенов, 1994; Трифонов и др., 2019];

$\rho_s=2,2\text{ т/м}^3$, ρ_n – от 1,84 т/м³ до 2,05 т/м³ – плотности грунтов соответственно эталонной площадки и площадки объекта (средневзвешенная по мощности на разведанную глубину) [Джурик и др., 1988].

Учитывая роль комплекса физико-геологических факторов и степень влияния их на сейсмический эффект, на основе специальных расчетов приращений интенсивности сейсмических колебаний относительно мощной (не менее 10–15 м) толщи гравийно-галечниковых грунтов с супесчано-суглинистым заполнителем до 30% и менее, принятых за эталон, установлено, что относительно них ($\rho=2,20\text{ г/см}^3$, $V_s=400\text{ м/с}$), приращение балльности на грунтах площадки с учетом их акустической жесткости по эмпирической зависимости С.В. Медведева [Медведев, 1962; Агаева, 2024] будет иметь вид:

$$\Delta I_{гр} = 1,67 \cdot \lg (\rho_s \cdot V_s / \rho_n \cdot V_n), \quad (2)$$

где: $\rho_s \cdot V_s$ – акустическая жесткость эталонного грунта;

$\rho_n \cdot V_n$ – акустическая жесткость грунтов исследуемого участка.

Расчетная сейсмичность ($I_{расч}$) территории площадки строительства мечети составит: $I_{расч} = I_{исх} + \Delta I_{гр} = 9,0 + 0,3 = 9,3$ балла.

Таким образом, сейсмичность участка строительства мечети в городе Аркадаге установлена на уровне 9,3 балла, рекомендуемая в качестве расчетной при проектировании.

Выводы

Главным фактором, осложняющим инженерно-геологические условия и определяющим проектное решение строительства мечети, является высокая сейсмичность территории и вытекающая отсюда сейсмическая опасность. Исходная сейсмичность г. Аркадага согласно НКСРТ-2017 составляет 9 баллов по шкале MSK-64. Расчетная сейсмичность площадки строительства мечети установлена на уровне 9,3 балла.

Выполненные инженерно-геологические изыскания на площадке строительства мечети на глубину 20,0–40,0 м выявили неоднородное строение толщи грунтов основания, в пределах которой выделены семь инженерно-геологических элементов, литологически представленных супесями, суглинками, пылеватými песками. Гидрогеологические условия благоприятные для строительства. Слабосолоноватые грунтовые воды на участке залегают на глубинах 10,0–10,5 м от поверхности дна котлована.

Согласно данным статического зондирования (СРТ) на площадке мечети было выполнено 4 опыта глубиной до 19,40–20,20 м (СРТ-01–СРТ-04). По факту до глубин 14,0 м (СРТ-01) – 16,6 м (СРТ-02, СРТ-03, СРТ-04) прослеживаются слабые пылеватые пески и супесчано-суглинистые грунты с показателем под конусом зонда « q » менее 2. Ниже 14,0–16,6 м показатель под конусом зонда « q » более 2. По некоторым опытам (например, в скважинах СРТ-01, 02, 04) и на глубинах 16–18,4 м встречаются прослойки очень слабых супесчано-суглинистых грунтов с « q » = 0,53–0,91.

Согласно данным испытания SPT-пенетрацией (скв. SPT-1–скв. SPT-4), глубиной 35 м, с существующей отметки поверхности земли – дна котлована (215,0 м) выявлены слабые и средней плотности грунты со значением $N=7–24$ удара в среднем до глубины 10,0–12,0 м, ниже залегают плотные пески пылеватые, пластичные супеси, с показателями $N=24–46$ ударов, далее, с глубины 16,0 м (SPT-1, SPT-2) – 22,0 м (SPT-3, SPT-4) плотные практически неразжижающиеся грунты со значением $N>50$ ударов.

В проекте строительства мечети были предусмотрены инженерные мероприятия и конструктивные решения по повышению несущей способности грунтов, их сейсмоустойчивости и сейсмостойкости конструкций. Рекомендации по подготовке оснований под фундамент мечети были разработаны НИИ Сейсмостойкого строительства – был рекомендован и применен фундамент глубокого заложения (свайный тип). В период строительства и эксплуатации мечети будет проведен мониторинг деформаций основания. Все принятые проектные решения учитывают природные условия площадки мечети в г. Аркадаге.

Таким образом, оценка расчетной сейсмичности, основанная на данных изучения грунтовых и сейсмических условий площадки мечети, позволит обеспечить долгую и бесперебойную эксплуатацию мечети в г. Аркадаге.

Литература

1. Абасеев С.С. Национальная карта общего сейсмического районирования Туркменистана. // Наука, техника и инновационные технологии в эпоху могущества и счастья. – 2017. – Т. 1. – С. 143–145.
2. Абасеев С.С., Атаев А.К., Ходжаев А. Оценка резонансных колебаний высотных зданий по данным измерений сейсмического шума. // Наука и техника Туркменистана. – 2014. – № 4. – С. 91–95.

3. Абасеев С.С., Хыдыркулиева М.Б. Новая методика сейсмического микрорайонирования Туркменистана (НМСМРТ) по данным цифровой регистрации микросейсмического волнового фона на поверхности районируемой территории. Сборник докладов международной научной конференции “Актуальные проблемы обеспечения сейсмической безопасности населения и территорий”, посвященной 80-летию АН Республики Узбекистан. Ташкент, 2023. – С. 127–135.
4. Агаева Л.А. Особенности влияния комплекса природно-техногенных факторов на сейсмический эффект. Ашхабад: Изд. «БЫлым», 2024. – 144 с.
5. Агаева Л.А. Оценка сейсмической опасности территории южной части города Ашхабада. Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. / Под редакцией В.Б. Заалишвили. – Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН, 2022. – С. 135–139.
6. Ананьев В.П., Потапов А.Д., Филькин Н.А. Специальная инженерная геология. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 263 с.
7. Джурик В.И., Потапов В.А., Севостьянов В.В. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность. Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. / Редактор О.В. Павлов. – М.: Наука, 1988. – 224 с.
8. Заалишвили В.Б., Камболов Д.А., Мельков Д.А., Фидарова М.И. Статистические характеристики расчета приращений сейсмической интенсивности при сейсмическом микрорайонировании горных территорий. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024а. – Т. 16. № 1. – С. 345–357. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-345-357.
9. 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. – 2024б. – Т. 14. № 2. – С. 45–60. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004.
10. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. – М.: Госстройиздат, 1962. – 284 с.
11. Трифонов Б.А., Севостьянов В.В., Милановский С.Ю., Несынов В.В. Оценка сейсмических свойств водонасыщенных дисперсных грунтов при решении задач сейсмического микрорайонирования // В сборнике: Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2019. № 5. – С. 74–81.
12. Ходжаев А. Оценка параметров сейсмических колебаний грунтов при землетрясениях Копетдагского сейсмоактивного региона. // Материалы XVII Всероссийской конференции с международным участием «Проблемы сейсмотектоники». – М.: Воронеж, 2011. – С. 515–518.
13. Хыдыркулиева М.Б. Оценка сейсмических свойств грунтов при инженерно-геологических изысканиях (на примере г.Ашхабада). Сборник докладов международной научной конференции “Актуальные проблемы обеспечения сейсмической безопасности населения и территорий”, посвященной 80-летию АН Республики Узбекистан. Ташкент, 2023. – С. 293–296.
14. Чернов Ю.К. Опыт экспресс-оценок спектров реакции по спектрам Фурье ускорений колебаний грунта при землетрясениях. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 113–127. DOI:10.46698/VNC.2024.44.23.010.
15. Эсенов Э.М. Сейсмическое микрорайонирование и прогноз сейсмических воздействий в Туркменистане: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 04.00.22 / Эсенов Эмиль Махтумович. – Ашгабат: Институт сейсмологии АН Туркменистана, 1994. – 50 с.
16. Эсенов Э.М. Усовершенствованный вариант карты СМР территории г.Ашхабада. Материалы международной конференции по снижению природных опасностей и рисков «Геориск-2018». М.: РУДН, 2018. Т. I. – С. 237–241.
17. Эсенов Э.М., Ходжаев А. Оценка сейсмической опасности территории по данным землетрясений. // Проблемы нефтегазогеологической науки и перспективы развития топливно-энергетического комплекса Туркменистана. – 1996. – С. 36–37.

18. Ядигаров Э.М., Мамарозилов Т.У., Авазов Ш.Б. Оценка V_s30 города Наманган для решения задач сейсмического микрорайонирования. Сборник докладов международной научной конференции “Актуальные проблемы обеспечения сейсмической безопасности населения и территорий”, посвященной 80-летию АН Республики Узбекистан. Ташкент, 2023. – С. 308–315.

19. Castellaro S., Mulargia F. V_s30 Estimates Using Constrained H/V Measurements. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2009. – Vol. 99. No. 2A. – pp. 761–773. DOI: 10.1785/0120080179.

20. Mokhberi M. Vulnerability evaluation of the urban area using the H/V spectral ratio of microtremors. // International Journal of Disaster Risk Reduction. – 2015. – Vol. 13. Issue 1. – pp. 369–374/ DOI: 10.1016/j.ijdr.2015.06.012.

21. Parolai S., Orunbaev S., Bindi D., Strollo A., Usupayev S., Picozzi M., Giacomo D.Di., Augliera P. et al. Site effect assessment in Bishkek (Kyrgyzstan) using earthquake and noise recording data. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2010. – pp. 3068–3082. DOI: 10.1785/0120100044.

22. Pilz M., Bindi D., Moldobekov B., Orunbaev S., Ullah S., Parolai S. Site effect studies in Khorog (Tajikistan). Scientific Technical Report; 14/10, Potsdam: Deutsches Geo Forschungs Zentrum GFZ, 2014. – 7 p. DOI: 10.2312/GFZ.b103-14100.

23. Tokeshi K., Harutoonian P., Leo C.J., Liyanapathirana S. Use of surface waves for geotechnical engineering applications in Western Sydney. // Advances in Geosciences. – 2013. – Vol. 35. – pp. 37–44. DOI: 10.5194/adgeo-35-37-2013.

24. Zaslavsky Y., Ataev G., Kalmanovich M., Gorstein M., Aksinenko T., Giller V., Perelman N. et al. Ambient noise measurements for seismic response and exploration of sedimentary layers: case of Kiryat Shemona. Israel: GFI, 2010. No 500/522/10. – 46 p.

References

1. Abaseev S.S. National map of the general seismic zoning of Turkmenistan. Science, Technology and Innovative Technologies in the Age of Power and Happiness. 2017. Vol. 1. pp. 143–145. (In Russ.)

2. Abaseev S.S., Ataev A.K., Khodzhaev A. Assessment of resonant vibrations of high-rise buildings based on seismic noise measurements. Science and Technology of Turkmenistan. 2014. No. 4. pp. 91–95. (In Russ.)

3. Abaseev S.S., Khydyrkulieva M.B. A new method of seismic microzonation of Turkmenistan (NMSMRT) based on digital recording of microseismic wave background on the surface of the zoned territory. In: Current problems of seismic safety of the population and territories”, dedicated to the 80th anniversary of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan. Tashkent. 2023. pp. 127–135. (In Russ.)

4. Agaeva L.A. Features of the influence of a complex of natural and man-made factors on the seismic effect. Ashgabat. Ylym. 2024. 144 p. (In Russ.)

5. Agayeva L.A. Assessment of seismic hazard in the southern part of Ashgabat. Hazardous natural and man-made processes in mountainous regions: models, systems, technologies. Vladikavkaz. GPI VSC RAS. 2022. pp. 135–139. (In Russ.)

6. Ananyev V.P., Potapov A.D., Filkin N.A. Special engineering geology. Moscow. INFRA-M. 2021. 263 p. (In Russ.)

7. Djurik V.I., Potapov V.A., Sevostyanov V.V. Assessment of the influence of soil conditions on seismic hazard. Methodological guide for seismic microzonation. Ed. O.V. Pavlov. Moscow. Nauka. 1988. 224. p. (In Russ.)

8. Zaalishvili V.B., Kambolov D.A., Melkov D.A., Fidarova M.I. Statistical characteristics calculation of seismic intensity increments for the purpose of seismic microzoning in mountain territories. Sustainable Development of Mountain Territories. 2024a. Vol. 16. No. 1. pp. 345–357. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-345-357. (In Russ.)

9. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Shmanatov G.V. Geoecological aspects of earth-quake intensity formation based on instrumental data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024b. Vol. 14. No. 2. pp. 45–60. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004. (In Russ.)
10. Medvedev S.V. Engineering seismology. Moscow. Gosstroyizdat. 1962. 284 p. (In Russ.)
11. Trifonov B.A., Sevostyanov V.V., Milanovsky S.Yu., Nesynov V.V. Assessment of seismic properties of water-saturated dispersed soils in solving seismic microzonation problems. In: *Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*. 2019. No. 5. pp. 74–81. (In Russ.)
12. Khodzhaev A. Assessment of the seismic vibrations parameters of soils during earthquakes in the Kopetdag seismically active region. In: *Proceedings of the XVII All-Russian Conference with international participation "Problems of seismotectonics"*. Moscow-Voronezh. 2011. pp. 515–518. (In Russ.)
13. Khydyrkulieva M.B. Assessment of seismic properties of soils during engineering-geological surveys (based on the example of Ashgabat). *Proceedings of the international scientific conference "Current issues in ensuring seismic safety of the population and territories," dedicated to the 80th anniversary of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan*. Tashkent. 2023. pp. 293–296. (In Russ.)
14. Chernov Yu.K. Rapid estimates experience of reaction spectra based on Fourier spectra of accelerations of ground motions during earthquakes. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14 No. 4. pp. 113–127. DOI: 10.46698/VNC.2024.44.23.010. (In Russ.)
15. Esenov E.M. Seismic microzonation and seismic impact prediction in Turkmenistan. The abstract of the dissertation of Dr. geol.-mineral sciences. 04.00.22. Ashgabat. Institute of Seismology of the Academy of Sciences of Turkmenistan. 1994. 50 p. (In Russ.)
16. Esenov E.M. An improved version of the SMZ map for the territory of Ashgabat. *Proceedings of the international conference on natural hazard and risk reduction Georisk-2018*. Moscow. RUDN. 2018. Vol. I. pp. 237–241. (In Russ.)
17. Esenov E.M., Khodzhaev A. Assessment of the seismic hazard of the territory according to earthquake data. *Problems of oil and gas geological science and prospects for the development of the fuel and energy complex of Turkmenistan*. 1996. pp. 36–37 (In Russ.)
18. Yadigarov E.M., Mamarozikov T.U., Avazov Sh.B. Assessment of Vs30 in the city of Namangan for seismic microzonation purposes. In: *Proceedings of the international scientific conference "Current issues in ensuring seismic safety of the population and territories," dedicated to the 80th anniversary of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan*. Tashkent. 2023. pp. 308–315. (In Russ.)
19. Castellaro S., Mulargia F. Vs30 Estimates Using Constrained H/V Measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2009. Vol. 99. No. 2A. pp. 761–773. DOI: 10.1785/0120080179.
20. Mokhberi M. Vulnerability evaluation of the urban area using the H/V spectral ratio of microtremors. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2015. Vol. 13. Issue 1. pp. 369–374/ DOI: 10.1016/j.ijdr.2015.06.012.
21. Parolai S., Orunbaev S., Bindi D., Strollo A., Usupayev S., Picozzi M., Giacomo D.Di., Augliera P. et al. Site effect assessment in Bishkek (Kyrgyzstan) using earthquake and noise recording data. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2010. pp. 3068–3082. DOI: 10.1785/0120100044.
22. Pilz M., Bindi D., Moldobekov B., Orunbaev S., Ullah S., Parolai S. Site effect studies in Khorog (Tajikistan). *Scientific Technical Report; 14/10*, Potsdam: Deutsches Geo Forschungs Zentrum GFZ. 2014. 7 p. DOI: 10.2312/GFZ.b103-14100.
23. Tokeshi K., Harutoonian P., Leo C.J., Liyanapathirana S. Use of surface waves for geotechnical engineering applications in Western Sydney. *Advances in Geosciences*. 2013. Vol. 35. pp. 37–44. DOI: 10.5194/ adgeo-35-37-2013.
24. Zaslavsky Y., Ataev G., Kalmanovich M., Gorstein M., Aksinenko T., Giller V., Perelman N. et al. Ambient noise measurements for seismic response and exploration of sedimentary layers: case of Kiryat Shemona. Israel. GFI. 2010. No 500/522/10. 46 p.

УДК 550.38

DOI: 10.46698/VNC.2025.42.83.001

Оригинальная статья

Стабильность флюидопроницаемости вулканогенных коллекторов при деформации

А.Б. Гасанов^{1,2}, Э.Ю. Аббасов³, Д.Н. Мамедова⁴

¹ Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
Республика Азербайджан, AZ1010, г. Баку, пр. Азадлыг, 20,
e-mail: adalathasanov@yahoo.com;

² Институт нефти и газа Министерства науки и образования Азербайджанской
Республики, Республика Азербайджан, AZ1000, г. Баку, ул. Ф. Амирова, 9;

³ Научно-исследовательский институт геотехнологических проблем нефти, газа и химии,
Республика Азербайджан, AZ1010, г. Баку, ул. 8 Ноября, 113;

⁴ Институт геологии и геофизики Министерства науки и образования Азербайджанской
Республики, Республика Азербайджан, AZ1143, г. Баку, пр. Г. Джавида, 119

Статья поступила: 02.05.2025, доработана: 04.09.2025, принята к публикации: 08.09.2025

Резюме: Актуальность выполненных исследований обусловлена тем, что в ряде случаев особенность разработки месторождений трудноизвлекаемых запасов (ТриЗ) связана с тем, что углеводородное сырье здесь приурочено к нетрадиционным – карбонатным коллекторам и вулканическим отложениям. Данная группа коллекторов отличается от традиционных, терригенных (песчаных) коллекторов значительным содержанием вулканического материала, что изменяет фильтрационно-емкостные свойства нефтесодержащих коллекторов. **Основной целью данного исследования** является обобщение данных о механических свойствах вулканических пород, потенциальных коллекторов нефти и газа, с выявлением условий стабильности пористости и фильтрационных свойств углеводородсодержащих вулканических коллекторов при разработке месторождений. **Методы исследования.** Большая часть фактического материала о деформации карбонатных коллекторов и вулканитов получена на уникальном экспериментальном устройстве в Страсбургском университете (Франция Institut Terre & Environnement de Strasbourg (ITES)). В этом устройстве обеспечиваются всестороннее гидростатическое давление, с одновременной трехосной деформацией. Максимальное всестороннее и поровое давления составляют 200 МПа, а осевая нагрузка достигает 400 МПа. **Результаты работы.** В результате обобщения и сопоставления экспериментальных данных следует, что по показателю прочности на сжатие (U_{cs}) все изученные вулканиты (туфы) характеризуются средними значениями 29,6 МПа, что по классификации Дира и Миллера соответствует «слабопрочным» средам ($U_{cs} \geq 55,0 - 27,5$ МПа). Однако из выделенных групп, игнимбритовые туфы, со средними значениями $U_{cs} = 11,18$ МПа, относятся к «очень слабопрочным» средам (по классификации Дира и Миллера). Средние значения предела прочности при изгибе (F_t) у испытанных туфов составляют 3,87 МПа, хотя в группе игнимбритовых туфов этот показатель ниже и равен 2,19 МПа. По показателям ударной вязкости (D_n), индекса сосредоточенной нагрузки (I_s) и твердости (H_B), группа игнимбритовых туфов также имеет самые низкие значения равные 3,15 МПа, 1,80 МПа и 4,58 кг/мм², при средних значениях по всем исследованным туфам равным 7,36 МПа, 2,42 МПа и 16,44 кг/мм² соответственно. Вместе с тем, в группе игнимбритовых туфов наблюдались достаточно высокие показатели стойкости к абразивному износу ($B_{sa} = 117,15$ см³/50 см²), при среднем значении по всем туфам 72,57 см³/50 см².

Ключевые слова: трудноизвлекаемые запасы, вулканогенно-осадочные коллекторы, деформация, фильтрационно-емкостные свойства.

Для цитирования: Гасанов А.Б., Аббасов Э.Ю., Мамедова Д.Н. Стабильность флюидопроницаемости вулканогенных коллекторов при деформации. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 53-65. DOI: 10.46698/VNC.2025.42.83.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.42.83.001

Original paper

Stability of fluid permeability of volcanogenic reservoirs under deformation

A.B. Hasanov^{1,2}, E.Yu. Abbasov³, D.N. Mamedova⁴

¹ Azerbaijan State Oil and Industry University, 20 Azadlig Ave., Baku AZ1010, Azerbaijan,
e-mail: adalathasanov@yahoo.com;

² Oil and Gas Institute, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, 9 F.
Amirov Str., Baku AZ1000, Azerbaijan;

³ Research Institute of Geotechnological Problems of Oil, Gas and Chemistry,
8 November Str., Baku AZ1010, Azerbaijan;

⁴ Institute of Geology and Geophysics, Ministry of Science and Education
of the Republic of Azerbaijan, 119 G. Javid Ave., Baku AZ1143, Azerbaijan

Received: 02.05.2025, revised: 04.09.2025, accepted: 08.09.2025

Abstract: The implemented research is **relevant** because in some cases the developing peculiarity of hard-to-recover reserves (HTR) fields is associated with the fact that the hydrocarbon content here is confined to unconventional – carbonate reservoirs and volcanic sediments. This group of reservoirs differs from traditional, terrigenous (sandy) reservoirs by a significant content of volcanic material, which changes the filtration-capacity properties of oil-containing reservoirs. **The main objective** of this study is summarizing the data on the mechanical properties of volcanic rocks, potential oil and gas reservoirs, with the identification of the stability conditions of the porosity and permeability properties of hydrocarbon-containing volcanic reservoirs during development of deposit. **Methods.** Most of the factual material on the deformation of carbonate reservoirs and volcanic obtained on a unique experimental device at the University of Strasbourg (France, Institute Terre & Environment de Strasbourg (ITES)). In this device, all-round hydrostatic pressure provided with simultaneous axial deformation. The maximum all-round and pore pressure is 200 MPa, and the axial load is 400 MPa. **Results.** Due to the generalization and existing data comparison follows that in terms of compressive strength (U_{cs}) all the studied tuffs are characterized by values of 29.6 MPa on average, which, according to the Deere and Miller classification, corresponds to “weakly strong” environments ($U_{cs} \geq 55.0$ –27.5 MPa). However between the selected groups ignimbrite tuffs, with average values of $U_{cs}=11.18$ MPa belong to “very weakly strong” matter (according to the Deere and Miller classification). The average values of flexural strength (F_{ts}) in the tested tuffs are 3.87 MPa, although in the group of ignimbrite tuffs this figure is lower and equals 2.19 MPa. In terms of impact toughness (D_n), point load index (I_s) and hardness (HB), the group of ignimbrite tuffs also has the lowest values – 3.15 MPa, 1.80 MPa and 4.58 kg/mm², with average values for all tuffs being 7.36 MPa, 2.42 MPa and 16.44 kg/mm², respectively. However, the group of ignimbrite tuffs demonstrated quite high rates of resistance to abrasive wear ($B_{sa}=117.15$ cm³/50 cm²), with an average for all tuffs equal to 72.57 cm³/50 cm².

Keywords: hard-to-recover reserves, volcanogenic-sedimentary reservoirs, deformation, filtration-capacitive properties.

For citation: Hasanov A.B., Abbasov E.Yu., Mamedova D.N. Stability of fluid permeability of volcanogenic reservoirs under deformation. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 53–65. DOI: 10.46698/VNC.2025.42.83.001

Введение

Известно, что геологический разрез многих известных нефтегазовых бассейнов часто представлен не традиционными терригенно-осадочными, а вулканогенно-осадочными толщами. В таких разрезах, часто причисляемых к нетрадиционным, промышленно нефтегазоносными являются вулканогенно-осадочные и вулканогенные горизонты [Даидбекова, Сафаров, 1979; Справочник ..., 1976; Тасман, 1959]. Приуроченные к подобным образованиям месторождения, выделяются в особый класс продуктивных коллекторов, состоящий из различных по петрографическому составу вулканогенных осадков, обладающих коллекторскими свойствами, подобно терригенным и карбонатным породам. В соответствии с этим, а также принимая во внимание все более возрастающие темпы мирового потребления горючих ископаемых, проблема изучения связи залежей нефти и газа с вулканогенными и вулканогенно-осадочными образованиями обретает особую актуальность в современной нефтегазодобывающей промышленности. Особый интерес при этом вызывают условия стабильности фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) вулканогенных коллекторов, в зависимости от компонентного состава, механических свойств и глубины залегания. Изученность перечисленных вопросов современными экспериментальными и теоретическими исследованиями позволяет охарактеризовать некоторые общие тенденции во внутрипластовом распределении пористости и проницаемости вулканогенных коллекторов, характера насыщения поровыми флюидами и механической деформации при эффективном давлении на глубинах залегания.

В частности, пластовая проницаемость коллектора обеспечивает эффективное давление поровых флюидов [Теймен, 2018; Ball et al., 2018; Day, 1996] и движение жидких и газообразных флюидов внутри резервуара [Carlino et al., 2018; Hurwitz et al., 2003]. Слабая внутрипластовая проницаемость может привести к неустойчивому эксплозивному состоянию и возникновению гидростатического коллапса поровой структуры [Bourbie, Zinszner, 1985; Reid, 2004]. С учетом изложенного, проницаемость вулканогенных коллекторов нефти и газа представляет интерес для моделирования глубинной гидротермальной конвекции и оптимизации добычи углеводородов на месторождениях с вулканогенно-осадочными и вулканогенными коллекторами.

Обоснование вопроса

Обычно на флюидопроницаемость влияют коллекторские свойства матрицы коллектора (пористость) и первичная структура массива (макроскопические неоднородности). Как правило, проницаемость горных пород имеет тенденцию к росту значений, в зависимости от величины пористости [Bourbie, Zinszner, 1985; Ehrenberg, Nadeau, 2005]. Помимо этого, на проницаемость также может влиять эффективное давление (литостатическое давление минус давление поровой жидкости), а также характер деформации (упругая или неупругая) [Acosta, Violay, 2020; Meng et al., 2019; Вольфман, 2023; Эзирбаев и др., 2024; Черненко и др., 2025]. Так, например, традиционно, проницаемость низкопористых кристаллических вулканитов увеличивается в хрупком режиме деформации [Acosta, Violay, 2020; Попков, Попков, 2023], но снижается в пластичном режиме. В то время как, проницаемость пород с высокой пористостью ($>0,10-0,15$) может снижаться и при хрупком и при пластичном режиме деформации [Ehrenberg, 2022; Heap et al., 2024; Hurwitz et al., 2003].

С другой стороны, в процессе разработки месторождения продуктивные коллекторы часто подвергаются возмущениям температуры, давления и напряжения. Так, в частности, напряжения внутри нефтегазового резервуара могут возрастать в процессе добычи и закачки, а поровое давление может быть увеличено или уменьшено как за счет закачки [Heap et al., 2022; Heap et al., 2024], так и за счет добычи [Farquharson et al., 2016] соответственно. Эти возмущения давления и напряжения приводят к изменению пористости и проницаемости коллекторов, что вызывает множество вторичных процессов, связанных с изменением потока жидкости и конвекции.

Методика и средства исследования

Механические деформации вулканогенных коллекторов, с целью определения соответствующих упруго-пластичных характеристик, получения зависимостей, описывающих вариации ФЕС, обычно исследуются в лабораторных условиях на специальных измерительных комплексах (ASTM C 241-90. Standard test method for abrasion resistance of stone subjected to foot traffic, Annual Book of ASTM Standards, AmeSoc Testing Mater (ASTM), 1990) [Al-Rbeawi, Jalal, 2019].

Цель настоящей работы – обобщение данных о механических свойствах вулканогенных пород, потенциальных коллекторов нефти и газа, с выявлением возможности прогнозирования стабильности ФЕС углеводородосодержащих вулканогенных коллекторов, в процессе разработки месторождения.

Из современных методов экспериментального определения механических свойств горных пород, можно отметить уникальный аппарат в Страсбургском университете (Франция Institut Terre & Environnement de Strasbourg (ITES)) (рис. 1).

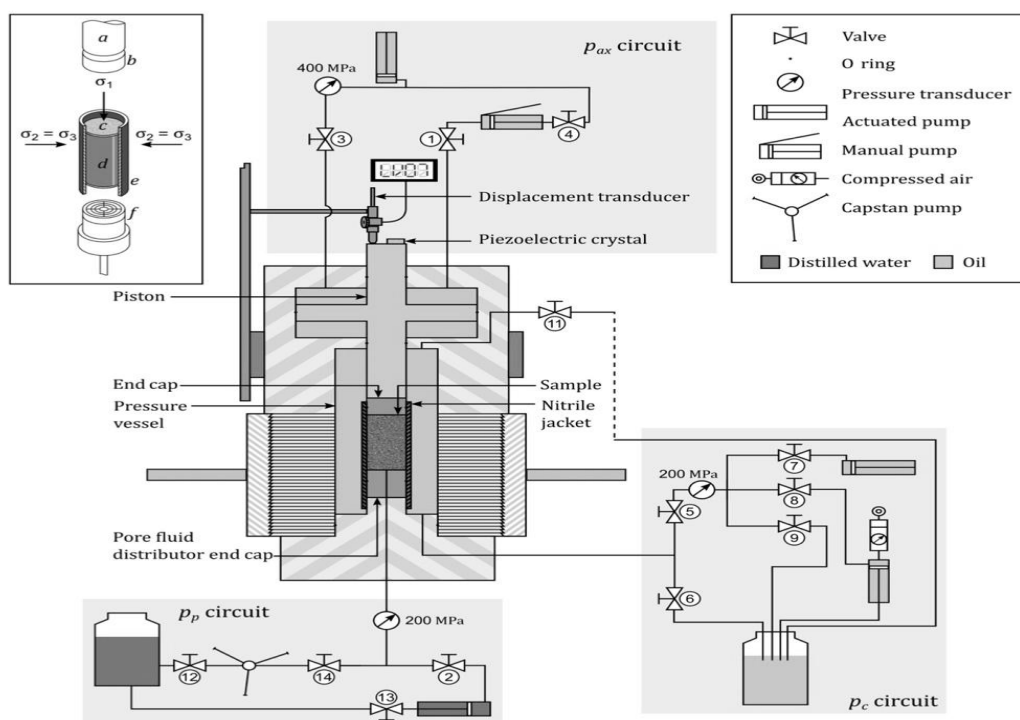


Рис. 1. Схема аппарата трехосной деформации в Институте Земли и окружающей среды (ITES) при Страсбургском университете, Франция [Farquharson et al., 2016] /

Fig. 1. Schematic diagram of the triaxial deformation apparatus at the Institute of Earth and Environment (ITES) at the University of Strasbourg, France [Farquharson et al., 2016]

В этом устройстве специально изготовленные цилиндрические образцы горных пород (диаметром 20 мм и длиной 40 мм) (рис. 2) деформируются при разных значениях всестороннего гидростатического давления, с одновременной трехосной деформацией. Максимальное всестороннее и поровое давления составляют 200 МПа, а одновременная максимальная осевая нагрузка достигает 400 МПа.

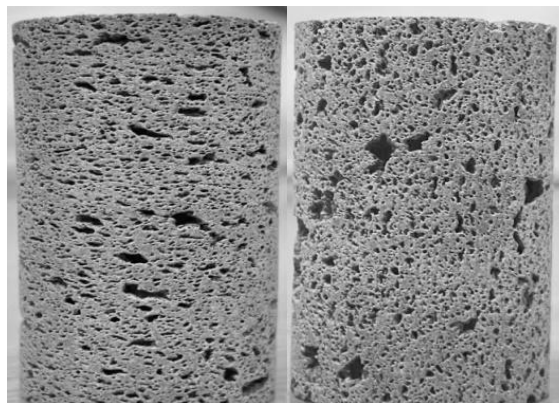


Рис. 2. Цилиндрические образцы вулканитов с горизонтальной и вертикальной ориентировкой начальной пористости /

Fig. 2. Cylindrical samples of volcanic rocks with horizontal and vertical orientation of initial porosity

В процессе деформации устройство позволяет измерять осевое смещение и осевую нагрузку, соответственно которым можно рассчитывать осевое напряжение и осевую деформацию, в сравнении с первоначальными размерами образца. Насосы для создания давления поровой жидкости позволяют одновременно измерять изменение пористости образца во время деформации, а с помощью датчика акустической эмиссии, расположенного на конце нижнего поршня, можно регистрировать также акустическую эмиссию при деформации. Акустическая эмиссия отражает образование и рост микротрещин в процессе нагружения и деформации образцов.

В отличие от вышеописанной методики, в качестве более оптимальной, можно отметить испытание среды на прочность методом точечной (сосредоточенной) нагрузки. При подобных испытаниях не требуется специальной подготовки образцов (ASTM C 241-90. Standard test method for abrasion resistance of stone subjected to foot traffic, Annual Book of ASTM Standards, AmeSoc Testing Mater (ASTM), 1990). При таком тестировании прочности пород, сферический стальной шарик диаметром 10 мм вдавливается в испытуемый образец. Причем действие вдавливающей нагрузки (от 50 до 3000 кг) на поверхность ограничено во времени (до 30 секунд), а в итоге фиксируются величина нагрузки и диаметр области вдавливания.

Другим элементарным лабораторным методом, является определение ударной вязкости образцов, с помощью формулы: $Dn = n(n+1)$, (где n — число ударов, приводящих к разрушению породы).

Часто привлекается также специальный показатель абразивного износа пород, который определяется в процессе смещения твердых поверхностей пород под воздействием приложенной нагрузки. Показатель абразивного износа имеет значение при взаимодействии различных пород в контактных зонах взаимодействия поверхностей пластов (ASTM C 241-90. Standard test method for abrasion resistance of stone subjected to foot traffic, Annual Book of ASTM Standards, AmeSoc Testing Mater (ASTM), 1990) [Al-Rbeawi, Jalal, 2019].

Величина твердости пород (по Бринеллю) напрямую характеризует прочность, т.е. сопротивляемость горных пород сдавливанию. Численные значения твердости по Бринеллю определяются по отношению приложенной нагрузки к площади поверхности вдавливания (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Результаты испытания различных образцов туфов, отобранных в окрестностях Вулкана Крафла (Исландия) (средние значения) /
Test results of different tuff samples from Krafla volcano (Iceland) (average values)

Код Проб/ Sample code	Типы Туфов/ Tuff's types	Структура/ Structure	U_{cs}	F_{ts}	D_n	B_{sa}	HB	I_s	V_p	U_w	P_o	W
			МПа / MPa			см³/50см²/ sm³/50sm²	кг/мм² / kg/mm²	МПа/ MPa	км/с/ km/s	г/см³/ g/sm³	%	МПа/ MPa
T-1	Дацитовый / Dazit glass	Стекловая / Glassious	69.2	6.24	17.0	27.2	49.2	4.69	2.94	1.97	14.5	7.4
T-3			54.7	5.37	12.0	34.5	39.2	2.97	2.55	1.96	16.7	8.5
T-6			43.9	5.00	10.3	41.2	27.8	2.86	2.71	1.89	19.8	10.5
T-9			32.8	3.88	8.2	58.5	10.9	1.90	1.92	1.74	20.7	11.9
T-11			26.4	4.32	9.4	41.1	17.9	2.45	2.04	1.87	23.5	12.9
T-12			26.9	4.20	6.6	52.3	7.5	1.97	2.03	1.55	29.5	18.8
T-13			26.1	4.82	5.9	57.3	12.1	2.55	2.21	1.58	25.8	16.3
T-14			20.9	3.29	7.4	56.7	8.1	2.11	2.32	1.60	29.2	18.2
T-18			25.5	4.56	8.8	56.0	15.8	2.42	2.29	1.88	26.7	12.8
T-26			28.8	4.45	7.8	63.7	15.6	1.90	2.78	1.61	26.9	16.6
T-27			34.2	4.55	8.2	65.6	12.0	2.29	2.23	1.89	18.2	9.7
average			35.4	4.61	9.24	50.37	19.65	2.56	2.37	1.78	22.86	13.05
T-4	Риолитовый / Rholit	Литоидная / Lithoidal	61.5	6.35	14.4	29.8	30.7	3.74	2.71	1.89	18.7	9.9
T-5			55.9	5.16	11.8	30.4	42.1	3.34	2.84	1.91	17.9	9.4
T-8			39.8	5.41	10.3	52.9	23.8	3.25	2.84	1.93	18.5	9.6
T-10			31.9	4.58	8.9	54.1	19.6	2.29	2.23	1.77	22.4	12.7
T-16			7.8	1.23	2.0	122.2	3.7	1.32	1.30	1.36	34.4	25.4
T-20			25.1	4.12	5.9	67.0	7.5	2.29	2.53	1.70	21.5	12.6
T-21			35.7	4.72	8.9	68.3	16.7	2.86	2.85	1.77	18.2	10.3
T-24			30.3	3.87	8.2	58.6	22.1	1.76	2.28	1.83	25.8	14.2
T-25			19.4	3.15	3.5	70.2	6.4	1.43	1.55	1.57	28.1	18.0
average			34.16	4.29	8.21	61.50	19.18	2.48	2.35	1.75	22.83	13.57
T-15	Игнимбритовый / Ignimbrit	Стекло- ватная / Glassious	16.8	3.62	5.9	86.4	11.5	2.17	2.22	1.47	33.2	23.0
T-19			6.6	1.37	2.0	139.1	1.9	1.51	1.36	1.34	37.5	27.9
T-22			6.7	1.55	2.0	130.0	2.2	1.65	1.25	1.52	31.6	20.8
T-23			14.6	2.22	2.7	113.1	2.7	1.86	1.85	1.50	30.3	19.5
average			11.18	2.19	3.15	117.15	4.58	1.80	1.67	1.46	33.15	22.80
T-2	Андезитовый/ Andezit	Лапилл Lapilly	59.9	5.50	11.8	28.3	32.1	3.60	2.75	2.02	13.9	6.9
T-17			15.1	3.32	5.9	94.2	12.6	2.14	2.15	1.44	33.4	24.7
average			37.50	4.41	8.85	61.25	22.35	2.87	2.45	1.73	23.65	15.80
Totalaverage			29.56	3.87	7.36	72.57	16.44	2.42	2.21	1.68	0	16.31

Результаты тестов на описанном выше устройстве (рис. 1) позволят лучше понять эволюцию деформации и проницаемости в вулканических коллекторах – резервуарах нефти и газа. Данные по проницаемости вулканического коллектора и, в особенности стабильность механических и физических свойств горных пород, могут улучшить понимание процесса флюидопереноса в вулканических коллекторах, поскольку эти типы коллекторов, в отличие от терригенных и карбонатных коллекторов, имеют более сложную поровую структуру и проницаемость [Hasanov et al., 2022; Qalkin et al., 2022; Sliapura et al., 2020].

Результаты и обсуждение

Результаты испытания образцов вулканических пород, в графическом виде, приведены на рисунке 3, иллюстрирующем зависимость между осевой нагрузкой и деформацией образцов при различных эффективных давлениях. Испытаниям подвергались группы вулканических туфов Вулкана Крафла (Исландия). Из рассмотрения кривых зависимости и данных таблицы 1 следует, что по прочности на сжатие (U_{cs}) исследованные туфы в среднем характеризуются значениями 29,6 МПа, что по классификации Дира и Миллера [Deere, Miller, 1966] соответствует «слабо прочным» средам (U_{cs}^3 55.0–27.5 МПа).

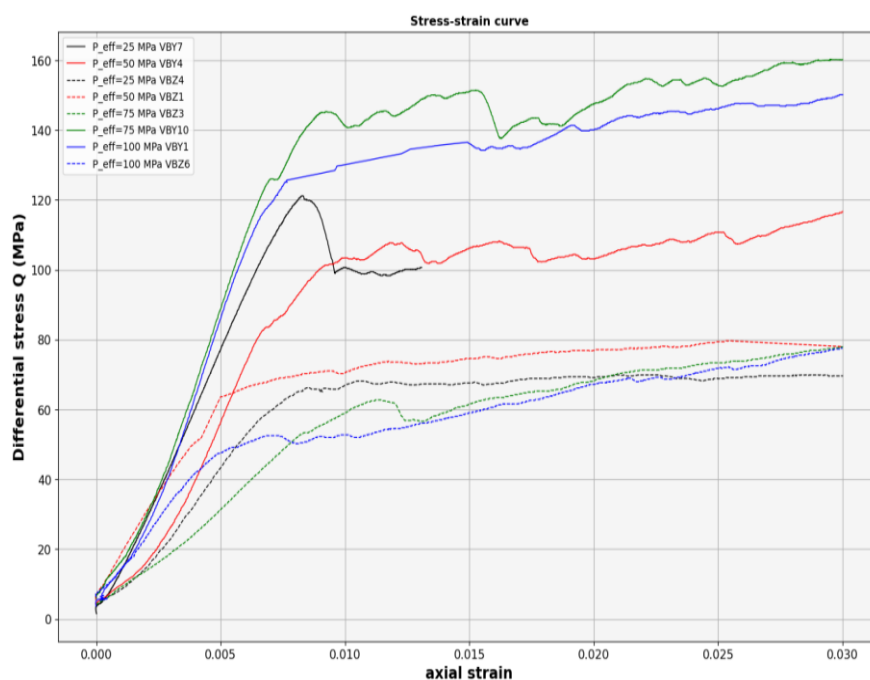


Рис. 3. Деформация вулканогенных образцов при воздействии осевой нагрузки и эффективного давления (25 – 100 МПа) /

Fig. 3. Deformation of volcanogenic samples under the influence of axial load and effective pressure (25 – 100 MPa)

Однако среди выделенных групп, игнимбритовые туфы со средними значениями U_{cs} =11.18 МПа принадлежат к «очень слабопрочным» (по классификации Дира и Миллера). Средние значения прочности на изгиб (F_{ts}) у испытанных туфов равны 3.87 МПа, хотя в группе игнимбритовых туфов этот показатель меньше и равен 2.19 МПа. По ударной вязкости (D_n), индексу точечной нагрузки (I_s) и твердости (H_V), группа игнимбритовых туфов также отличается наименьши-

ми значениями – 3.15 МПа, 1.80 МПа и 4.58 кг/мм², при средних для всех туфов 7.36 МПа, 2.42 МПа и 16.44 кг/мм² соответственно. Однако группа игнимбритовых туфов продемонстрировала достаточно высокие показатели по стойкости на абразивный износ ($B_{sa}=117.15 \text{ см}^3/50\text{см}^2$), при среднем значении для всех туфов, равном $72.57 \text{ см}^3/50\text{см}^2$.

Примерно, аналогично вышеизложенному, распределяются также и осредненные значения физических характеристик (плотности U_w , открытой пористости P_o , влажности W и скорости продольных волн V_p) по группам туфов. Так при средних значениях плотности и скорости продольных волн всех испытанных туфов, соответственно 1.68 г/см³ и 2.21 км/с, в группе игнимбритовых туфов эти показатели оказались слабее и составили 1.46 г/см³ и 1.67 км/с соответственно. И, наоборот, при средних значениях пористости и влажности всех испытанных туфов, равных соответственно 25.62 % и 16.31 МПа, в группе игнимбритовых туфов эти показатели оказались выше и составили соответственно 33.15 % и 22.80 МПа.

Для выявления возможных корреляционных зависимостей между отдельными физико-механическими свойствами осадочно-вулканогенных осадков и действующей нагрузкой, был проведен статистический анализ значений прочности на сжатие и на изгиб, ударной вязкости (прочности) и стойкости на абразивный износ. Значения этих же механических показателей сопоставлялись с физическими свойствами туфов (плотность, влажность, пористость, скорость продольных волн, твердость по Бринеллю и индекс точечной нагрузки) (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Корреляционные связи между отдельными физическими свойствами тестируемых туфов /
Correlation relationships between individual physical properties of the tested tuffs

№№ п/п	Взаимозависимые параметры / Interdependent parameters	Оптимальное уравнение регрессии / Optimal regression equation	Коэффициент корреляции / Correlation coefficient
1	Прочность на сжатие (МПа) и индекс точечной нагрузки (МПа) / Compressive strength (MPa) and point load index (MPa)	$Y = 19.5 (X) - 16.2$	$R = 0.82$
2	Прочность на сжатие (МПа) и открытая пористость (%) / Compressive strength (MPa) and open porosity (%)	$Y = -56.48 \ln (X) + 209.84$	$R = 0.84$
3	Прочность на сжатие (МПа) и твердость (кг/мм ²) / Compressive strength (MPa) and hardness (kg/mm ²)	$Y = 1.2581 X + 9.6626$	$R = 0.87$
4	Прочность на сжатие (МПа) и скорость продольной волны (км/с) / Compressive strength (MPa) and longitudinal wave velocity (km/s)	$Y = 4.5314 X^{2.2296}$	$R = 0.68$
5	Прочность на изгиб (МПа) и индекс точечной нагрузки (МПа) / Flexural strength (MPa) and point load index (MPa)	$Y = 3.7946 \ln (X) + 0.877$	$R = 0.77$

6	Прочность на изгиб (МПа) и водонасыщение в весовой пропорции (г/см ³) / Flexural strength (MPa) and water saturation by weight (g/sm ³)	$Y = -0.1948 X + 6.9885$	$R = 0.73$
7	Прочность на изгиб (МПа) и твердость (кг/мм ²) / Flexural strength (MPa) and hardness (kg/mm ²)	$Y = 1.3792 \text{ Ln } (X) + 0.5732$	$R = 0.82$
8	Прочность на изгиб (МПа) и скорость продольной волны (км/с) / Flexural strength (MPa) and longitudinal wave velocity (km/s)	$Y = 1.1068 X^{1.555}$	$R = 0.80$
9	Ударопрочность (МПа) и индекс точечной нагрузки (МПа) / Impact resistance (MPa) and point load index (MPa)	$Y = 10.965 \text{ Ln } (X) - 1.3277$	$R = 0.82$
10	Ударопрочность (МПа) и плотность сухой породы (г/см ³) / Impact resistance (MPa) and density of dry rock (g/sm ³)	$Y = 16.117 X - 19.7$	$R = 0.76$
11	Ударопрочность (МПа) и твердость (кг/мм ²) / Impact resistance (MPa) and hardness (kg/mm ²)	$Y = 1.1068 X^{0.6394}$	$R = 0.90$
12	Ударопрочность (МПа) и скорость продольной волны (км/с) / Impact resistance (MPa) and longitudinal wave velocity (km/s)	$Y = 1.2375 X^{2.1686}$	$R = 0.81$

Выводы

Обобщение данных экспериментального исследования физических и механических свойств для некоторых типов вулканогенных горных пород (туфов) показало наличие существенной взаимосвязи между значениями пористости, плотности и другими прочностными свойствами. В частности, группы дацитовых, риолитовых, игнимбритовых и андезитовых туфов имеют некоторые различия в осредненных значениях физико-механических параметров, что особенно ощущается для группы игнимбритовых туфов.

Из сопоставления результатов следует, что по прочности на сжатие (U_{cs}) исследованные туфы в среднем характеризуются значениями 29,6 МПа, что по классификации Дира и Миллера соответствует «слабопрочным» средам (U_{cs}^3 55.0–27.5 МПа). Однако среди выделенных групп игнимбритовые туфы со средними значениями $U_{cs}=11.18$ МПа принадлежат к «очень слабопрочным» (по классификации Дира и Миллера). Средние значения прочности на изгиб (F_{ts}) у испытанных туфов равны 3.87 МПа, хотя в группе игнимбритовых туфов этот показатель меньше и равен 2.19 МПа. По ударной вязкости (D_n), индексу точечной нагрузки (I_s) и твердости (H_V), группа игнимбритовых туфов также отличается наименьшими значе-

ниями – 3.15 МПа, 1.80 МПа и 4.58 кг/мм², при средних для всех туфов 7.36 МПа, 2.42 МПа и 16.44 кг/мм² соответственно. Однако группа игнимбритовых туфов продемонстрировала достаточно высокие показатели по стойкости на абразивный износ ($B_{sa}=117.15 \text{ см}^3/50\text{см}^2$), при среднем для всех туфов, равном $72.57 \text{ см}^3/50\text{см}^2$.

Примерно, аналогично вышеизложенному, распределяются также и осредненные значения физических характеристик (плотность U_w , открытая пористость P_o , влажность W и скорость продольных волн V_p) по группам туфов. Так, при средних значениях плотности и скорости продольных волн всех испытанных туфов, соответственно 1.68 г/см³ и 2.21 км/с, в группе игнимбритовых туфов эти показатели оказались меньше и составили 1.46 г/см³ и 1.67 км/с соответственно. И, наоборот, при средних значениях пористости и влажности всех испытанных туфов, равных соответственно 25.62 % и 16.31 МПа, в группе игнимбритовых туфов эти показатели оказались выше и составили соответственно 33.15 % и 22.80 МПа.

В целом, измеренные показатели деформации лучше отражают зависимость между направленной нагрузкой и результирующей деформацией образцов при различных эффективных давлениях, а выявленные взаимозависимости значений пористости, плотности и других прочностных свойств, позволяют лучше понять эволюцию процесса деформации и проницаемости в вулканических коллекторах в процессе разработки нефтегазовых месторождений ТРИЗ.

Литература

1. Вольфман Ю.М. Динамика изменений напряженно-деформированного состояния земной коры Черноморской впадины в моделях сейсмогенеза. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 40–54. DOI: 10.46698/VNC.2023.83.75.004.
2. Дайдбекова Э.А., Сафаров Г.И. Особенности формирования залежей нефти в эффузивных породах месторождения Мурадханлы. // Геология нефти и газа. – 1979. – № 9. – С. 56–57.
3. Попков В.И., Попков И.В. О сохранении поровых коллекторов в нижней части разреза нефтегазоносных отложений триаса Скифско-Туранской платформы. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 106 – 117. DOI: 10.46698/VNC.2023.10.85.009
4. Справочник по нефтяным и газовым месторождениям зарубежных стран. Кн.1, 2. / Редактор И.В. Высоцкий. – М.: Недра, 1976. – 600 с.
5. Тасман С.Е. Связь нефтегазопроявлений с изверженными породами в Турции. В кн.: XX Международный геол. конгресс. Материалы по геологии нефти. Страны Европы и Турция. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – С. 24–25.
6. Теймен А. Прогнозирование основных механических параметров туфов по результатам испытаний. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 5. – С. 18–32. DOI: 10.15372/FTPRPI20180503.
7. Черненко К.И., Саидова К.М., Еремина Н.В., Шатохин Н.Е. Выделение зон повышенной трещиноватости нефтекумского природного резервуара Восточно-Безводненского месторождения с использованием программного продукта «tНавигатор». // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 2. – С. 206–218. DOI: 10.46698/VNC.2025.97.91.001.
8. Эзирбаев Т.Б., Гацаева С.С.-А., Абдулшахидова Х.А. Анализ зависимости пористости нижнемеловых коллекторов Терско-Сунженской нефтегазоносной области от петрофизических параметров. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 194–206. DOI:10.46698/VNC.2024.29.28.015.
9. Acosta M., Violay M. Mechanical and hydraulic transport properties of transverse isotropic Gneiss deformed under deep reservoir stress and pressure conditions. // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2020. – Vol. 130. Art. No. 104235.

10. Al-Rbeawi S., Jalal F. Fluid flux throughout matrix-fracture interface: Discretizing hydraulic fractures for coupling matrix Darcy flow and fractures non-Darcy flow. // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 73. Art. No. 103061. DOI: 10.1016/j.jngse.2019.103061.
11. Ball J.L., Taron J., Reid M.E., Hurwitz S., Finn C., Bedrosian P. Combining multiphase groundwater flow and slope stability models to assess stratovolcano flank collapse in the Cascade Range. // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2018. – Vol. 123. Issue 4. – pp. 2787–2805. DOI: 10.1002/2017jb015156.
12. Bourbie T., Zinszner B. Hydraulic and acoustic properties as a function of porosity in Fontainebleau sandstone. // *Journal of Geophysical Research*. – 1985. – Vol. 90(B13). pp. 11524–11532. DOI: 10.1029/jb090ib13p11524.
13. Carlino S., Piochi M., Tramelli A., Mormone A., Montanaro C., Scheu B., Klaus M. Field-scale permeability and temperature of volcanic crust from borehole data: CampiFlegrei, southern Italy. // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2018. – Vol. 357. – pp. 276–286. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2018.05.003.
14. Day S.J. Hydrothermal pore fluid pressure and the stability of porous, permeable volcanoes. // *Geological Society, London, Special Publications*. – 1996. – Vol. 110(1). – pp. 77–93. DOI: 10.1144/gsl.sp.1996.110.01.06.
15. Deere D.U., Miller R.P. Engineering classification and index properties for intact rock. Illinois: Univ at Urbana Dept of Civil Engineering, 1966. – 327 p.
16. Ehrenberg S.N. The etiology of carbonate porosity AAPG. // *American Association of Petroleum Geologists*. – 2022. – Vol. 106. No. 12. – pp. 2351–2386. DOI: 10.1306/08082221065.
17. Ehrenberg S.N., Nadeau P.H. Sandstone vs. carbonate petroleum reservoirs: A global perspective on porosity-depth and porosity-permeability relationships. // *AAPG Bulletin*. – 2005. – Vol. 89. Issue 4. – pp. 435–445 DOI: 10.1306/11230404071.
18. Farquharson J.I., Heap M.J., Baud P. Strain-induced permeability increase in volcanic rock. // *Geophysical Research Letters*. – 2016. – Vol. 43(22). – pp. 11–603. DOI: 10.1002/2016gl071540.
19. Hasanov A.B., Isfandiyarov O.A., Mehraliyeva N.H., Abbasov T.S. Stability conditions of oil-saturated reservoirs porosity with deep overlaying. // *ANAS Transactions, Earth Sciences*. – 2022. – Vol. 2. – pp. 46–53. DOI: 10.33677/ggianas20220200081.
20. Heap M.J., Bayramov K., Meyer G.G., Violay M.E.S. et al. Compaction and permeability evolution of tuffs from Krafla volcano (Iceland). // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2024. – Vol. 129. Issue 8. Art. No. e2024JB029067. DOI: 10.1029/2024JB029067.
21. Heap M.J., Meyer G.G., Noel C., Wadsworth F.B., Baud P., Violay M.E. The permeability of porous volcanic rock through the brittle-ductile transition. // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2022. – Vol. 127. Issue 6. Art. No. e2022JB024600. DOI: 10.1029/2022jb024600.
22. Hurwitz S., Kipp K.L., Ingebritsen S.E., Reid M.E. Groundwater flow, heat transport, and water table position within volcanic edifices: Implications for volcanic processes in the Cascade Range. // *Journal of Geophysical Research*. – 2003. – Vol. 108(B12). Issue 2557. DOI: 10.1029/2003jb002565.
23. Meng F., Baud P., Ge H., Wong T.-F. The effect of stress on limestone permeability and effective stress behavior of damaged samples. // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2019. – Vol. 124. Issue 1. – pp. 376–399. DOI: 10.1029/2018jb016526.
24. Qalkin S.V., Savitskiy Y.V., Osovetski B.M., Kazimov K.P., Qurbanov V.S., Hasanov A.B., Abbasova Q.Q., Kazimov R.R. Detailed study of hydraulic fracturing of Kashiro-Verey rocks by electron microscopy. // *ANAS Transactions, Earth Sciences*. – 2022. – Vol. 1. – pp. 17–27. DOI: 10.33677/ggianas20220100069.
25. Reid M.E. Massive collapse of volcano edifices triggered by hydrothermal pressurization. // *Geology*. – 2004. – Vol. 32. Issue 5. – pp. 373–376. DOI: 10.1130/g20300.1.
26. Sliupa S.A.U.L.I.U.S., Lozovskis S., Lazauskiene J., Sliapiene R. Petrophysical and mechanical properties of the lower Silurian perspective oil/gas shales of Lithuania. // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 79. Art. No. 103336.

References

1. Wolfman Yu.M. Dynamics of changes in the stress-strain state of the earth's crust of the Black Sea Basin in seismogenesis models. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 40–54. DOI: 10.46698/VNC.2023.83.75.004. (In Russ.)
2. Daidbekova E.A., Safarov G.I. Features of oil deposit formation in effusive rocks of the Muradkhanly field. *Geology of Oil and Gas*. 1979. No. 9. pp. 56–57. (In Russ.)
3. Popkov V.I., Popkov I.V. On the preservation of pore reservoirs in the lower part of the section of Triassic oil and gas-bearing deposits of the Scythian-Turanian platform. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 106–117. DOI: 10.46698/VNC.2023.10.85.009. (In Russ.)
4. Handbook of oil and gas fields of foreign countries. Book 1, 2. Ed. I.V. Vysotsky. Moscow. Nedra. 1976. 600 p. (In Russ.)
5. Tasman S.E. Relationship of oil and gas shows with igneous rocks in Turkey. In the book: XX International Geological Congress. In: Materials on Oil Geology. Countries of Europe and Turkey. Moscow. Gostoptekhizdat. 1959. pp. 24–25. (In Russ.)
6. Teymen A. Forecasting the main mechanical parameters of tuffs based on test results. *Physico-technical Problems of Mining*. 2018. No. 5. pp. 18–32. DOI: 10.15372/FTPRPI20180503. (In Russ.)
7. Chernenko K.I., Saidova K.M., Yeriomina N.V., Shatokhin N.E. Identification of increased fracturing zones of the Neftekumsk natural reservoir on the Vostochno-Bezvodnenskoye field using the software product “tNavigator”. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 2. pp. 206–218. DOI: 10.46698/VNC.2025.97.91.001. (In Russ.)
8. Ezirbaev T.B., Gatsaeva S.S-A., Abdulshahidova H.A. Analysis of dependence of porosity of Lower Cretaceous reservoirs of the Tersko-Sunzhenskaya oil and gas bearing area on petrophysical parameters. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 195–206. DOI: 10.46698/VNC.2024.29.28.015. (In Russ.)
9. Acosta M., Violay M. Mechanical and hydraulic transport properties of transverse isotropic Gneiss deformed under deep reservoir stress and pressure conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020. Vol. 130. Art. No. 104235.
10. Al-Rbeawi S., Jalal F. Fluid flux throughout matrix-fracture interface: Discretizing hydraulic fractures for coupling matrix Darcy flow and fractures non-Darcy flow. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2019. Vol. 73. Art. No. 103061. DOI: 10.1016/j.jngse.2019.103061.
11. Ball J.L., Taron J., Reid M.E., Hurwitz S., Finn C., Bedrosian P. Combining multiphase groundwater flow and slope stability models to assess stratovolcano flank collapse in the Cascade Range. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2018. Vol. 123. Issue 4. pp. 2787–2805. DOI: 10.1002/2017jb015156.
12. Bourbie T., Zinszner B. Hydraulic and acoustic properties as a function of porosity in Fontainebleau sandstone. *Journal of Geophysical Research*. 1985. Vol. 90(B13). pp. 11524–11532. DOI: 10.1029/jb090ib13p11524.
13. Carlino S., Piochi M., Tramelli A., Mormone A., Montanaro C., Scheu B., Klaus M. Field-scale permeability and temperature of volcanic crust from borehole data: CampiFlegrei, southern Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2018. Vol. 357. pp. 276–286. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2018.05.003.
14. Day S.J. Hydrothermal pore fluid pressure and the stability of porous, permeable volcanoes. Geological Society, London, Special Publications. 1996. Vol. 110(1). pp. 77–93. DOI: 10.1144/gsl.sp.1996.110.01.06.
15. Deere D.U., Miller R.P. Engineering classification and index properties for intact rock. Illinois. Univ at Urbana Dept of Civil Engineering. 1966. 327 p.
16. Ehrenberg S.N. The etiology of carbonate porosity AAPG. American Association of Petroleum Geologists. 2022. Vol. 106. No. 12. pp. 2351–2386. DOI: 10.1306/08082221065.

17. Ehrenberg S.N., Nadeau P.H. Sandstone vs. carbonate petroleum reservoirs: A global perspective on porosity-depth and porosity-permeability relationships. *AAPG Bulletin*. 2005. Vol. 89. Issue 4. pp. 435–445. DOI: 10.1306/11230404071.
18. Farquharson J.I., Heap M.J., Baud P. Strain-induced permeability increase in volcanic rock. *Geophysical Research Letters*. 2016. Vol. 43(22). pp. 11–603. DOI: 10.1002/2016gl071540.
19. Hasanov A.B., Isfandiyarov O.A., Mehraliyeva N.H., Abbasov T.S. Stability conditions of oil-saturated reservoirs porosity with deep overlying. *ANAS Transactions, Earth Sciences*. 2022. Vol. 2. pp. 46–53. DOI: 10.33677/ggianas20220200081.
20. Heap M.J., Bayramov K., Meyer G.G., Violay M.E.S. et al. Compaction and permeability evolution of tuffs from Krafla volcano (Iceland). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2024. Vol. 129. Issue 8. Art. No. e2024JB029067. DOI: 10.1029/2024JB029067.
21. Heap M.J., Meyer G.G., Noel C., Wadsworth F.B., Baud P., Violay M.E. The permeability of porous volcanic rock through the brittle-ductile transition. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2022. Vol. 127. Issue 6. Art. No. e2022JB024600. DOI: 10.1029/2022jb024600.
22. Hurwitz S., Kipp K.L., Ingebritsen S.E., Reid M.E. Groundwater flow, heat transport, and water table position within volcanic edifices: Implications for volcanic processes in the Cascade Range. *Journal of Geophysical Research*. 2003. Vol. 108(B12). Issue 2557. DOI: 10.1029/2003jb002565.
23. Meng F., Baud P., Ge H., Wong T.-F. The effect of stress on limestone permeability and effective stress behavior of damaged samples. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2019. Vol. 124. Issue 1. pp. 376–399. DOI: 10.1029/2018jb016526.
24. Qalkin S.V., Savitskiy Y.V., Osovetski B.M., Kazimov K.P., Qurbanov V.S., Hasanov A.B., Abbasova Q.Q., Kazimov R.R. Detailed study of hydraulic fracturing of Kashiro-Verey-rocks by electron microscopy. *ANAS Transactions, Earth Sciences*. 2022. Vol. 1. pp. 17–27. DOI: 10.33677/ggianas20220100069.
25. Reid M.E. Massive collapse of volcano edifices triggered by hydrothermal pressurization. *Geology*. 2004. Vol. 32. Issue 5. pp. 373–376. DOI: 10.1130/g20300.1.
26. Sliupa S.A.U.L.I.U.S., Lozovskis S., Lazauskiene J., Sliapiene R. Petrophysical and mechanical properties of the lower Silurian perspective oil/gas shales of Lithuania. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020. Vol. 79. Art. No. 103336.

УДК 550.34.013.2:551.2 (479-924.73)

DOI: 10.46698/VNC.2025.39.32.001

Оригинальная статья

Совершенствование мониторинга оползневых процессов горных склонов при наличии транспортной инфраструктуры

Р.В. Ключев¹, В.С. Бригида²

¹ Московский политехнический университет, Россия, 107023, г. Москва,
ул. Б. Семеновская, 38, e-mail: kluev-roman@rambler.ru,

² Федеральный исследовательский центр
«Субтропический научный центр Российской академии наук»,
Россия, 354002, г. Сочи, ул. Я. Фабрициуса, 2/28,
e-mail: 1z011@inbox.ru

Статья поступила: 12.08.2025, доработана: 15.09.2025, принята к публикации: 19.09.2025

Резюме: Актуальность работы. Изменение климата и усиление экстремальных гидрометеорологических явлений, таких как оползни, создают существенные угрозы для устойчивости транспортной инфраструктуры на Черноморском побережье Кавказа. Особую опасность представляют собой деградированные склоновые системы, находящиеся под воздействием антропогенной нагрузки, на которых расположены автомобильные дороги. Они являются элементами критической инфраструктуры для горных территорий юга России. Визуальные наблюдения остаются основным первичным методом геотехнического мониторинга состояния дорожной сети. В то же время наличие резко изменяющихся горно-геологических и гидрогеологических условий, а также отсутствие информации о состоянии подповерхностных слоев пород не позволяет выявить особенности кинематики деформационных процессов оползневых тел. В связи с этим актуализируется необходимость совершенствования методологии выбора параметров геофизических методов геоэкологического мониторинга. **Цель исследований** – совершенствование методов геофизического мониторинга оползневых процессов склоновых систем в условиях горных территорий Кавказа. **Методика исследований** включала анализ отечественных и зарубежных источников в области классификации факторов, которые инициируют появление оползней; оценку эффективности использования геофизических методов мониторинга, а также возможности использования искусственных нейронных сетей для обработки массивов больших данных. **Результаты исследования** показали, что комбинация ERT и сейсмических исследований позволяет сформировать высококачественные пространственные модели изучаемого массива почвенного покрова и горных пород, что в сочетании с ANN позволяет повысить точность прогностического анализа.

Ключевые слова: оползни, горные территории, склоны, геологические опасности, транспортная инфраструктура, геофизический мониторинг.

Для цитирования: Ключев Р.В., Бригида В.С. Совершенствование мониторинга оползневых процессов горных склонов при наличии транспортной инфраструктуры. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 66-78. DOI: 10.46698/VNC.2025.39.32.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.39.32.001

Original paper

Improving monitoring of landslide processes on mountain slopes in the presence of transport infrastructure

R.V. Klyuev¹, V.S. Brigida²

¹ Moscow Polytechnic University, 38 B. Semenovskaya, Moscow 107023, Russian Federation, e-mail: kluev-roman@rambler.ru,

² Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 2/28 Ya. Fabriciusa Str., Sochi 354002, Russian Federation, e-mail: 1z011@inbox.ru

Received: 12.08.2025, revised: 15.09.2025, accepted: 19.09.2025

Abstract: Relevance. Climate change and the intensification of extreme hydrometeorological events, such as landslides, pose significant threats to the sustainability of transport infrastructure on the Black Sea coast of the Caucasus. Correspond the particular danger are degraded slope systems under the influence of anthropogenic load, on which highway are located, which are elements of critical infrastructure for mountainous areas of southern Russia. Visual observations remain the main primary method of geotechnical monitoring of the road network condition. At the same time, the presence of sharply changing mining and geological and hydrogeological conditions, as well as the lack of information on the condition of subsurface layers of rocks, do not allow identifying the features of the kinematics of deformation processes of landslide bodies. In this regard, the need to improve the methodology for selecting parameters of geophysical methods of geoecological monitoring is becoming more urgent. **The aim** of the research is to improve the methods of geophysical monitoring of landslide processes of slope systems in the mountainous areas of the Caucasus. **The research methodology** included an analysis of Russian and foreign sources in the field of classification of factors that initiate the occurrence of landslides; an assessment of the effectiveness of using geophysical monitoring methods, as well as the possibility of using artificial neural networks to process big data arrays. **The results** of the study showed that the combination of ERT and seismic studies allows for the formation of high-quality spatial models of the studied soil cover and rock massif, which, in combination with ANN, improves the accuracy of predictive analysis.

Keywords: landslides, mountainous areas, slopes, geological hazards, transport infrastructure, geophysical monitoring.

For citation: Klyuev R.V., Brigida V.S. Improving monitoring of landslide processes on mountain slopes in the presence of transport infrastructure. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 66-78. DOI: 10.46698/VNC.2025.39.32.001

Введение

Склоновые системы, на которых расположены автомобильные дороги, являются элементами критической инфраструктуры для горных территорий юга России, особенно Черноморского побережья Кавказа [Свалова, 2022; Яицкая, Бригида, 2022; Бурдзиева и др., 2024а, б; Tutberidze et al., 2025; Zakharikhina et al., 2024; Jaiswal, van Westen, 2013]. Деградация склоновых систем, усугубляемая глобальными климатическими процессами, является существенной угрозой для обеспечения устойчивого социально-экономического развития Южного и Северо-Кавказского федеральных округов. Разрушение склонов вблизи транспортной инфраструктуры проявляется в виде

оползней различных типов, селей или формированием техногенно или естественно обусловленных трещиноватых структур на дорожном полотне. Одним из ярких примеров последствий отказа транспортной инфраструктуры при обеспечении устойчивой мобильности в туристских территориях является сход оползня в ноябре 2024 г. на 189-м км трассы А-147 Джубга – Сочи (в Хостинском районе г. Сочи) [Brigida et al., 2024]. В связи с этим отдельным вопросом остается идентификация и оценка основных «запускающих факторов» (triggering), а также степени их выраженности для конкретных условий эксплуатации опасных участков дорог [Wei et al., 2024].

Для снижения рисков потери устойчивости склоновых систем транспортной инфраструктуры (СТИ) необходимо совершенствование методологии геоэкологического мониторинга, а также систем ранней диагностики состояния геосреды. Кроме того важным аспектом является развитие системы раннего предупреждения на основе интегрированного подхода к оценке риска, прогнозной аналитики и непрерывного мониторинга текущей ситуации [Whiteley et al., 2019; Идармачев, 2022, 2025]. Современная нормативная оценка оползневой опасности основана на «комбинированном» способе, в котором на основании ретроспективного статистического анализа для каждого фактора влияния приведена балльная оценка вероятности смещения. Тем не менее, одновременная реализация нескольких запускающих факторов оползня сложно поддается прогнозу на основе нормативных методов.

Визуальные наблюдения остаются основным первичным методом геотехнического мониторинга состояния дорожной сети. Периодичность осмотров, в отличие от иностранных аналогов [Highland, Bobrowsky, 2008] где частота осмотра варьируется от 2-х до 10-ти лет, для каждого случая определяется индивидуально. В дополнение к визуальным оценкам, чаще используют непрерывные измерения ключевых показателей стабильности почвы. А в случае интеграции с системами раннего предупреждения – геофизические, геотехнические, а также методы дистанционного зондирования земли (ДЗЗ). Тем не менее, чаще всего используются непрерывные изменения отдельных геотехнических параметров, датчиков или точек наблюдений (реперные точки). В условиях субтропической зоны Кавказа, с наличием резкоизменяющихся горногелогических и гидрогеологических условий, при помощи такого подхода сложно выявить особенности кинематики деформационных процессов склоновых систем. Это усугубляет проблемы формирования достоверных моделей «медленных смещений» при использовании пространственно-рассредоточенных геодезических сетей. При использовании геостатистического анализа космических снимков или данных с беспилотных летательных аппаратов также существует ряд ограничений: высокая цена снимков с высоким пространственным разрешением; проблема наличия облачного покрова; проблема обработки больших данных, особенно для мультиспектральных изображений. Кроме того, для целей оценки оползневой опасности, только использование ДЗЗ невозможно вследствие оценки только поверхностной составляющей (без учета типа и характеристик почв, почвенной влаги и воздействия осадков) [Xu et al., 2024]. При условиях максимального влияния залповых ливней (Черноморское побережье Кавказа) идентификация опасного участка дороги невозможна напрямую по данным об объеме осадков без учета эвапотранспирации и условий дренирования подземных вод [Kaaya, Midilli, 2020].

Для преодоления данных ограничений геотехнических и дистанционных методов мониторинга наиболее представительным является использование геофизических исследований в сочетании с обработкой данных на основе искусственных нейронных сетей. Главным преимуществом геофизических методов является получение пространственных моделей подповерхностных слоев в масштабе оползнево-

го тела при минимальных затратах на бурение геологических скважин. Геофизические подходы к геоэкологическому мониторингу оползневых структур обсуждались многими исследователями [Whiteley et al., 2019; Tsai, Lin, 2022; Керимов, Эльжаев, 2024; Uyanik, 2019]. Тем не менее, комплексный анализ их использования для целей обеспечения надежности транспортной инфраструктуры остается недостаточно изученным. В связи с тем, что устойчивость склоновых систем обуславливает наличие существенных техногенных рисков потери транспортной доступности отдаленных или горных территорий, смягчение проявлений климатических изменений на Кавказе, является важной научной задачей.

Цель работы – совершенствование методов геофизического мониторинга оползневых процессов склоновых систем в условиях горных территорий Кавказа при наличии транспортной инфраструктуры. Для ее достижения решались следующие задачи: анализировались геофизические методы и факторы, инициирующие появление оползневых процессов в склоновых системах; классифицировались алгоритмы искусственных нейронных сетей используемых при оценке оползневых процессов.

Методы исследования

Методология исследований включала анализ отечественных и зарубежных источников в области классификации факторов, которые инициируют появление оползней; оценку эффективности использования геофизических методов мониторинга геосреды, а также возможности использования искусственных нейронных сетей для обработки массивов больших данных при решении геоэкологических задач.

Результаты и обсуждение

Анализ геофизических методов и факторов инициирующих появление оползневых процессов в склоновых системах

Из анализа зарубежной литературы [Highland, Bobrowsky, 2008] следует, что, например, американский подход подразумевает разделение триггеров оползневой опасности на 3-и типа: естественные, физические и человеческие (антропогенные). К первому типу относятся: влияние осадков и таяние снега, выветривание, а также наводнение. Ко второму типу – влияние геологических причин (типы и физико-механические свойства геоматериалов, их жесткость, трещиноватость, сланцеватость и др.) и морфологических причин (тектоника, различного рода эрозии, осадконакопление, наличие растительности). К третьему типу относятся: наличие орошения или использование нестабильных земляных насыпей, вырубка леса, наличие отходов, искусственное отклонение речного течения и др. В свою очередь к нормативным для формирования оползня в нашей стране относят факторы I-го и II-го типов. К первому (наиболее значимому) типу относятся только: геологическое строение, рельеф и экспозиция склона. Ко второму же – осадки, режим грунтовых вод, растительность, сейсмическая активность, воздействие речного потока, антропогенное действие и процессы выветривания [Prapolski, Romanovski, 2025]. Исходя из этого, следует, что фотометрические и дистанционные методы не могут диагностировать наличие опасности всех факторов первой группы как отечественной, так и зарубежной классификации, что обуславливает необходимость подбора рациональных параметров геофизического мониторинга [Yaitskaya et al., 2023].

Геофизические методы, основанные на неразрушающем контроле состояния подповерхностного слоя техногенно трансформированных ландшафтов представ-

ляют существенные преимущества при оценке индикаторов оползневой опасности. Сейсмические методы или, например, томография электрического удельного сопротивления (ERT) довольно эффективно применяются для оценки нарушений внутренней структуры почв обусловленных зарождением и реализацией деформационных процессов. Кроме того, они расширяют горизонты косвенной оценки гидрологического режима и механических свойств почвенного покрова. Сейсмические методы довольно часто используются для оценки подземной структуры массива, наличия неоднородностей или трещиноватых структур. Обнаружение сейсмических сигналов обеспечивается за счет геофонов, которые преобразуют звуковые сигналы различной амплитуды в непрерывный поток цифровой информации. Методы поверхностных волн (многоканальный анализ поверхностных волн – MASW) продемонстрировали высокую производительность при обнаружении мелких трещиноватых структур и оценке скорости сдвиговых волн [Tsai, Lin, 2022]. Благодаря использованию регрессионного анализа стало возможным установление взаимосвязей между сейсмическими волнами и свойствами почв (пористость, уровень насыщения водой) [Uyanik, 2019]. Кроме того, пространственные модели распространения Р-волн позволяют достоверно характеризовать уровень содержания влаги или прочность на сдвиг [Uyanik, 2019]. Одним из наиболее современных направлений в данной области является применение распределенного акустического зондирования (DAS), которое позволяет повысить качество пространственно-временных моделей при экономии средств на проведение исследований [Zhu et al., 2023].

Георадиолокационный метод базируется на использовании георадаров для просвечивания почвенных профилей и коренных пород. Метод реализуется посредством генерации электромагнитных волн и последующего поглощения отраженных сигналов. Отражаемые сигналы характеризуют поверхности ослабления, трещиноватые структуры или водные объекты. Полученные геопропространственные модели могут отображать изменения гидрологического режима подземных вод, что является существенным для инициирования оползней на горных склонах [Wu et al., 2019]. Использование одновременно нескольких антенн с различной частотой генерации импульсов позволяет получать профили различных глубин с соответствующей степенью детализации. Одним из основных существенных ограничений метода является невозможность его использования для автоматического мониторинга в режиме реального времени, а также сложность при отсутствии резкой разницы в градиентах (например, после дождя), когда массив выглядит как неконтрастные слои с одинаковой отражательной способностью [Kara et al., 2025].

Электрические методы разделяют на три основные группы: само потенциальная томография или SPT, электротомография (ERT) и индуцированная поляризационная томография (IPT). При этом ERT является наиболее перспективной для исследуемых вопросов, поскольку хорошо подходит для оценки наиболее критичных для развития оползней параметров исследуемого массива. В нем сначала измеряется кажущееся удельное сопротивление пород, а затем на основе инверсии рассчитывается истинное распределение. Преимуществом данного метода является возможность определения пространственной динамики почвенной влаги и водоносных горизонтов, пористости пород, солености подземных вод [Slater, Binley, 2021]. Это обусловило широкое использование данного метода для задач гидрогеологии и детального определения параметров залегания слоев пород. Использование недорогих электродов, высокая степень масштабируемости, а также проведение повторных измерений с использованием инверсии по времени, позволяет осуществить геоэкологический мониторинг в пространстве-времени (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Достоинства и недостатки основных геофизических методов мониторинга /
Advantages and disadvantages of the main geophysical monitoring methods**

Методы/ Methods	Достоинства/Advantages	Недостатки/Disadvantages
Сейсмические /Seismic	К достоинствам стоит отнести универсальность и чувствительность данных методов при обнаружении поверхности оползневого тела в слоях почвы. Также способность DAS обеспечивать непрерывный пространственный охват больших территорий и обнаруживать незначительные смещения точек. Кроме того, преимуществом является получение достоверных величин мощности отдельных стратиграфических пластов пород. / The advantages include the versatility and sensitivity of these methods in detecting the surface of a landslide body in soil layers. Also, the ability of DAS to provide continuous spatial coverage of large areas and detect minor point shifts. In addition, the advantage is obtaining reliable values of the thickness of individual stratigraphic layers of rocks.	Высокие эксплуатационные расходы и объемы полученных данных являются существенными ограничениями для их широкого развертывания в условиях местности со сложным ландшафтом. В городской местности наличие посторонних шумов и фоновых помех усложняет сбор и интерпретацию полученных сигналов. Сезонная изменчивость может внести существенные коррективы, что может повлиять на надежность и точность геопро пространственных моделей и локализации опасных областей. / High operating costs and volumes of data obtained are significant limitations for their widespread deployment in areas with complex terrain. In urban areas, the presence of extraneous noise and background interference complicates the collection and interpretation of the received signals. Seasonal variability can make significant adjustments, which can affect the reliability and accuracy of geospatial models and the localization of hazardous areas.
Электрические /Electrical	Методы эффективны при мониторинге изменений влажности почв, а также картировании поверхностных неоднородностей. Возможность развертывания относительно недорогих электродных сетей для долгосрочного мониторинга склоновых систем с высоким разрешением способствует предпочтительности использования данного метода при обследовании больших площадей. Инверсия удельного сопротивления и электротомография имеют наибольшее разрешение, что делает их универсальными для целого ряда геотехнических и гидрологических задач. Быстрый сбор и обработка данных позволяют формировать геомодели в минимальные сроки. / The methods are effective in monitoring changes in soil moisture, as well as in mapping surface heterogeneities. The possibility of deploying relatively inexpensive electrode networks for long-term monitoring of slope systems with high resolution contributes to the preference for using this method when surveying large areas. Inversion of specific resistance or electrical tomography have the highest resolution, which makes them universal for a number of geotechnical and hydrological problems. Rapid data collection and processing allow the formation of geomodels in minimal time.	К основным недостаткам метода стоит отнести трудности с калибровкой, низким разрешением на большой глубине просвечивания массива, а также сложности в интерпретации инверсионных решений. Также сложности сопровождают просвечивание обводненных или глинистых массивов горных пород. / The main disadvantages of the method include difficulties with calibration, low resolution at a large depth of massif transillumination, as well as difficulties in interpreting inversion solutions. Difficulties are also accompanied by transillumination of waterlogged or clayey rock massifs.

Георадары/Ground penetrating radars	Сильными сторонами метода являются быстрота развертывания и экономичность проведения экспериментальных работ. Отдельным положительным моментом является возможность обнаружения водоносных горизонтов, и возможность проведения исследований в режиме реального времени. Также гибкость и мобильность переносных георадаров, а в некоторых случаях (критична для дорожной инфраструктуры) возможность проведения исследований без непосредственного контакта с дорожным покрытием. / The strengths of the method are the speed of deployment and the cost-effectiveness of conducting experimental work. A separate positive point is the ability to detect aquifers and the ability to conduct research in real time. Also the flexibility and mobility of portable ground penetrating radars, and in some cases (critical for road infrastructure) the ability to conduct research without direct contact with the road surface.	Проблема сложности интерпретации полученных данных при апробировании относится и к данному типу геофизических методов. Кроме того, для радиолокационного метода чувствительным аспектом остается проблема ложных отражений и ослабления сигнала с глубиной. / The problem of the complexity of interpreting the data obtained during testing also applies to this type of geophysical methods. In addition, for the radar method, the sensitive aspect remains the problem of false reflections and signal attenuation with depth.
-------------------------------------	--	--

Для получения синергетического эффекта необходимо разумное сочетание нескольких типов геофизических методов, например ERT и сейсмоакустических [Lu et al., 2025]. Сейсмические методы могут предоставить информацию с высоким разрешением о характере и динамике смещений, а также характере и пространственной ориентации системы трещин, в то время как ERT позволяет детализировать флюидодинамику и особенности залегания грунтовых вод [Pang et al., 2025].

Использование искусственных нейронных сетей при оценке оползневых процессов

В последнее десятилетие развитие интеллектуального анализа способствовало бурному развитию нейро-сетевых алгоритмов [Kapanski et al., 2025; Bhowmik et al., 2025; Hristova et al., 2023] (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Достоинства и недостатки использования основных искусственных нейронных сетей / Advantages and disadvantages of the main uses of artificial neural networks

Методы ANN/ ANN Methods	Достоинства / Advantages	Недостатки / Disadvantages
Многослойные перцептроны /Multilayer Perceptrons (MLP)	Возможность реализации нелинейного моделирования позволяет аппроксимировать сложные функциональные зависимости. Гибкая архитектура позволяет настраивать скрытые слои, оптимизируя производительность для задач построения регрессии. Высокая адаптивность позволяет осуществлять эффективное обобщение на неизвестные данные. / The ability to implement nonlinear modeling allows you to approximate complex functional dependencies. Flexible architecture allows you to configure hidden layers to optimize performance for regression problems. High adaptability allows you to effectively generalize to unknown data.	Модели усложняясь, становятся очень чувствительными к переобучению. Ограниченная способность фиксировать пространственные зависимости ограничивает использование метода при обработке последовательных данных. / Models become more complex and become very sensitive to pretraining. Limited ability to capture spatial dependencies limits the use of the method when processing sequential data.

Графовые нейронные сети / Graph Neural Networks (GNN)	Операторы свертки графов агрегируют информацию о соседстве данных. Инвариантность к перестановкам позволяет обеспечить согласованность прогнозов, независимо от порядка узлов. Возможность топографического анализа для повышения эффективности вычислений. / Graph convolution operators aggregate information about the neighborhood of data. Permutation invariance ensures consistency of predictions regardless of node order. Possibility of topographic analysis to improve computational efficiency.	Узкие места в памяти возникают при обработке больших или графов разных размеров. Ограниченная эффективность при обработке неоднородных графов. / Memory bottlenecks occur when processing large or different sized graphs. Limited efficiency when processing heterogeneous graphs.
Свёрточные нейронные сети / Convolutional Neural Networks (CNN)	Распределение весов сокращает количество параметров, что повышает эффективность вычислений. Хорошо себя зарекомендовали в задачах обработки изображений в связи с иерархическим обучением признакам с помощью сверточных фильтров. / Weight distribution reduces the number of parameters, which increases computational efficiency. They have proven themselves well in image processing tasks due to hierarchical feature learning using convolutional filters.	Структурная специализация для распределенных сеточных данных (например, пикселей в растрах) ограничивает применимость метода. Также метод имеет ограниченную интерпретируемость данных, а также сложности при оценке экстремальных явлений. / Structural specialization for distributed grid data (e.g. pixels in rasters) limits the applicability of the method. The method also has limited interpretability of data, as well as difficulties in assessing extreme events.
Длинная цепь элементов краткосрочной памяти / Long Short-Term Memory networks (LSTM)	Компоненты памяти обеспечивают избирательное долговременное сохранение информации, что позволяет улучшить обобщение информации на новые данные. / Memory components provide selective long-term storage of information, which improves the generalization of information to new data.	Избыточность ячеек памяти увеличивают ресурсоемкость на параметризацию более чем в 2 раза по сравнению с рекуррентными нейронными сетями. Сложности в обеспечении эффективной обработки протяженных временных рядов данных или последовательностей. / Redundancy of memory cells increases the resource intensity for parameterization by more than 2 times compared to recurrent neural networks. Difficulties in ensuring efficient processing of extended time series of data or sequences.
Глубокие нейронные сети / Deep Neural Networks (DNN)	Эффективно подходит к задачам распознавания образов. Возможность автоматизированного извлечения признаков при сохранении адаптивности к различным типам данных. / Effectively approaches pattern recognition tasks. Possibility of automated feature extraction while maintaining adaptability to different types of data.	Статистическая природа этих сетей затрудняет работу с редкими событиями или граничными случаями, недостаточно представленными в обучающих распределениях. / The histological nature of these networks makes it difficult to work with rare events or edge cases that are underrepresented in training distributions.

Искусственные нейронные сети или ANN представляют собой вычислительные алгоритмы, напоминающие биологические нейроны. Lucchese [Lucchese et al., 2021] успешно использовал метод многослойных персептронов для построения литологии, цифровой модели местности, расстояния до проезжей части и уклонов элементов склоновых систем. Также этот метод может быть использован при определении количества осадков, нормализованного индекса разности растительности (NDVI) или определении геологических особенностей местности [Ikram et al.,

2023]. При исследовании оползневых процессов алгоритм ANN (свёрточные нейронные сети) эффективно применялся для оценки неблагоприятных геологических и гидрологических условий, а также уровня сейсмичности местности [Aslam et al., 2023]. В работе Ма метод «глубокие нейронные сети» показал хорошие результаты при определении геопро пространственного расположения водоразделов и разломных структур [Ma et al., 2023].

Из проведенного анализа следует, что общим ограничением для большинства алгоритмов нейронных сетей является проблема обоснования параметров «качества-соответствия» при выборе конкретного алгоритма [Zaalishvili et al., 2022]. Следующим немаловажным аспектом является энергоёмкость и, следовательно, дороговизна вычислений. Необходимость наличия ретроспективных наборов больших данных и высокое потребление ресурсов становится вызовом для многих развитых стран (с высокой долей проникновения методов искусственного интеллекта). Разрозненность не агрегированных данных из датчиков различных типов также обуславливает невозможность формирования в отдельных случаях обобщенных дата-сетов и дата-кубов.

Выводы

Учитывая негативные последствия климатических изменений, вопросы интенсификации деформационных процессов склоновых систем в условиях горных территорий имеют ключевое значение при обеспечении устойчивого развития Черноморского побережья Кавказа. Это имеет решающее значение для сохранения и приумножения рекреационной привлекательности туристских дестинаций в городе-курорте Сочи. Традиционные методы мониторинга не всегда адекватно отражают влияние гидрологических и геологических условий инициирования оползневых процессов. Из проведенного анализа следует, что необходима интеграция геопро пространственного анализа космических снимков с геофизическими методами (сейсмоакустический и электротомография), которая позволит получить дуальные цифровые двойники, как ландшафтных, так и подповерхностных частей склоновых систем. Обработка агрегированных данных протяженных временных рядов из разрозненных датчиков и растровых снимков должна проводиться с использованием нейросетевых методов, в зависимости от выбранной совокупности критериев «качества подгонки».

В связи с использованием методов интеллектуального анализа для прогнозной аналитики остается пока недостаточно решенной проблема высокой вычислительной стоимости исследований, а также сложности агрегирования и формирования типизированных наборов больших данных. Дальнейшие исследования стоит сфокусировать на оптимизации и обосновании рациональных параметров отдельных алгоритмов ANN для их интеграции в системы оповещения населения о возможности наступления опасных геологических процессов.

Литература

1. Бригида В.С., Мишулина С.И., Стась Г.В. Перспективные направления экологизации структурных элементов туристского продукта Краснодарского края (на примере транспортной составляющей). // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – Т. 12. № 1. – С. 18–25. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-1-18–25.
2. Бурдзиева О.Г., Мельков Д.А., Ревазов М.О., Кортиев А.Л. Активизация оползневых процессов, обусловленная урбанизацией горных территорий. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024а. – Т. 16. № 4. – С. 1646–1658. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1646-1658.

3. Бурдзиева О.Г., Ревазов М.О., Кортиев А.Л., Гогичев Р.Р. Влияние воздействия геодинамических процессов на геоэкологическую нагрузку горного региона. // Геология и геофизика Юга России. – 2024б. – Т. 14. № 4. – С. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014.
4. Идармачев Ш.Г. Система непрерывного мониторинга параметров трещин в горном массиве на основе резистивных датчиков. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 1. – С. 82–91. DOI: 10.46698/VNC.2025.78.66.007.
5. Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Алиев И.А., Идармачев И.Ш. Изучение динамики ширины трещины потенциально обвального скального массива струнным датчиком на горе Гуниб (Дагестан). // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 2. – С. 78–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.70.64.006.
6. Керимов И.А., Эльжаев А.С. Применение геофизических методов при изучении оползневых процессов. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 66–83. DOI: 10.46698/VNC.2024.91.39.007.
7. Свалова В.Б. Управление геоэкологическим риском и проблемы устойчивого развития горных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 1. – С. 129–147. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010.
8. Яицкая Н.А., Дзагания Л.М., Бригида В.С. Геоэкологические опасности в условиях климатических изменений территорий субтропической зоны Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 118–132. DOI: 10.46698/VNC.2023.54.85.010.
9. Aslam B., Zafar A., Khalil U. Comparative analysis of multiple conventional neural networks for landslide susceptibility mapping. *Natural Hazards*. 2023. Vol. 115. pp. 673–707. DOI: 10.1007/s11069-022-05570-x.
10. Bhowmik A., Kumar R., Ranganathaswamy M.K., Kumar, Y.K., Samal P., Mahapatro A. et al. Predictive modeling of the mechanical behavior of 3D-printed polylactic acid/wood composite: Comparison of GEP and ANN methods. *AIP Advances*. 2025. Vol. 15. Issue 4. DOI: 10.1063/5.0268653.
11. Highland L.M., Bobrowsky P. The landslide handbook – A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular. 2008. Vol. 1325. 129 p.
12. Hristova T., Savov N., Yanev N. Municipal solid waste and non-hazardous waste processing for sustainable circular economy through blockchain. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2023. Vol. 58. Issue 3. pp. 513–521. DOI: 10.59957/jctm.v58i3.81.
13. Ikram R.M.A., Dehrashid A.A., Zhang B., Chen Z., Le B.N., Moayedi H. A novel swarm intelligence: Cuckoo optimization algorithm (COA) and SailFish optimizer (SFO) in landslide susceptibility assessment. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2023. Vol. 37. pp. 1717–1743.
14. Jaiswal P., van Westen C.J. Use of quantitative landslide hazard and risk information for local disaster risk reduction along a transportation corridor: A case study from Nilgiri district, India. *Natural Hazards*. 2013. Vol. 65. pp. 887–913. DOI: 10.1007/s11069-012-0404-1.
15. Kapanski A., Hruntovich N.V., Klyuev R.V., Brigida V.S. Identification of easily accessible urban water consumption factors for energy-efficient management of pumping stations. *Water Conservation Science and Engineering*. 2025. Vol. 10. Art. No. 46. DOI: 10.1007/s41101-025-00372-1.
16. Kara M.E., Seren A., Koroglu F., Alemdag H. Ground-penetrating radar (GPR) tomographic imaging and estimation of the volumetric water content of a viaduct pillar using the simultaneous iterative reconstruction technique algorithm. *NDT & E International*. 2025. Vol. 156. Art. No. 103448. DOI: 10.1016/j.ndteint.2025.103448.
17. Kaya A., Midilli U.M. Slope stability evaluation and monitoring of a landslide: A case study from NE Turkey. *Journal of Mountain Science*. 2020. Vol. 17. pp. 2624–2635. DOI: 10.1007/s11629-020-6306-x.
18. Lu K., Li K., Li F. et al. Using electrical resistivity techniques (ERT and SP) for nondestructive detection of seepage channels at the Leitai heritage site, China. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. No. 904. DOI: 10.1038/s41598-025-85368-6.

19. Lucchese L.V., de Oliveira G.G., Pedrollo O.C. Investigation of the influence of nonoccurrence sampling on landslide susceptibility assessment using Artificial Neural Networks. *Catena*. 2021. Vol. 198. Art. No. 105067. DOI: 10.1016/j.catena.2020.105067.
20. Ma W., Dong J., Wei Z., Peng L., Wu Q., Wang X., Wu Y. Landslide susceptibility assessment using the certainty factor and deep neural network. *Frontiers in Earth Science*. 2023. Vol. 10. Art. No. 1091560. DOI: 10.3389/feart.2022.1091560.
21. Pang Y., Yu Z., Xie Z. et al. Study of 3D electrical resistivity tomography in offshore waters. *Doklady Earth Sciences*. 2025. Vol. 523. Art. No. 19. DOI: 10.1134/S1028334X24605698.
22. Prapolski D., Romanovski V. Recent advances in underground water deironing and demanganization: Comprehensive review. *Journal of Water Process Engineering*. 2025. Vol. 70. Art. No. 107089. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107089.
23. Slater L., Binley A. Advancing hydrological process understanding from long-term resistivity monitoring systems. *Wiley Interdisciplinary Reviews Water* 2021. Vol. 8. Issue 3. Art. No. e1513. DOI: 10.1002/wat2.1513.
24. Tsai C.C., Lin C.H. Review and future perspective of geophysical methods applied in nearshore site characterization. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10. Art. No. 344. DOI: 10.3390/jmse10030344.
25. Tutberidze T.V., Ryndin A.V., Besedin T.D. et al. Interrelation between growing conditions in caucasus subtropics and actinidia deliciosa ‘Hayward’ yield for the sustainable agriculture. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. Art. No. 6499 DOI: 10.3390/su17146499.
26. Uyanik O. Estimation of the porosity of clay soils using seismic P- and S-wave velocities. *Journal of Applied Geophysics*. 2019. Vol. 170. Art. No. 103832 DOI: 10.1016/j.jappgeo.2019.103832.
27. Wei L., Zeng Z., Yan J. Factors affecting the stability of Loess Landslides: A review. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Issue 7. Art. No. 2735. DOI: 10.3390/app14072735.
28. Whiteley J.S., Chambers J.E., Uhlemann S., Wilkinson P.B., Kendall J.M. Geophysical monitoring of moisture-induced landslides: A review. *Reviews of Geophysics*. 2019. Vol. 57. Issue 1. pp. 106–145. DOI: 10.1029/2018RG000603.
29. Wu K., Rodriguez G.A., Zajc M., Jacquemin E., Clement M., De Coster A., Lambot S. A new drone-borne GPR for soil moisture mapping. *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 235. Art. No. 111456. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111456.
30. Xu H., Shu B., Zhang Q., Du Y., Zhang J., We T., Xiong G.H., Dai X.L., Wang L. Site selection for landslide GNSS monitoring stations using InSAR and UAV photogrammetry with analytical hierarchy process. *Landslides*. 2024. Vol. 21. pp. 791–805. DOI: 10.1007/s10346-023-02188-31.
31. Zaalishvili V., Burdzieva O., Kanukov A., Zaks T. Eco-Geophysical and Geoecological Factors in Assessing the State of the Geological Environment Based on the Analysis of Spatial Databases of the Territory of the Republic of North Ossetia-Alania. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Art. No. 2644. DOI: 10.3390/app12052644.
32. Zakharikhina L., Lesnikova P., Rogozhina E., Kerimzade V., Gorbunova D. Influence of wind direction on the elemental composition of atmospheric deposition on the Black Sea coast of Sochi, Russia. *Environment and Ecology Research*. 2024. Vol. 12. Issue 5. pp. 514–536. DOI: 10.13189/eer.2024.120505.
33. Zhu W., Biondi E., Li J. et al. Seismic arrival-time picking on distributed acoustic sensing data using semi-supervised learning. *Nature Communications*. 2023. Vol. 14. Art. No. 8192. DOI: 10.1038/s41467-023-43355-3.

References

1. Brigida V.S., Mishulina S.I., Stas G.V. Perspective directions of “Ecologisation” of structural elements of a tourist product of Krasnodar Region (case study of transportation component). *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020. Vol. 12 No. 1. pp. 18–25. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-1-18–25. (In Russ.)

2. Burdzieva O.G., Melkov D.A., Revazov M.O., Kortiev A.L. Activation of landslide processes caused by urbanization of mountainous areas. Sustainable Development of Mountain Territories. 2024a. Vol. 16. No. 4. pp. 1646–1658. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1646-1658. (In Russ.)
3. Burdzieva O.G., Revazov M.O., Kortiev A.L., Gogichev R.R. Influence of geodynamic processes on the geoecological load of mountain region. Geology and Geophysics of Russian South. 2024b. Vol. 14. No. 4. pp. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014. (In Russ.)
4. Idarmachev Sh.G., Cherkashin V.I., Aliyev I.A., Idarmachev I.Sh. Studying the dynamics of the crack width of a potentially collapsing rock massif with a string sensor on Mount Gunib (Dagestan). Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 78–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.70.64.006. (In Russ.)
5. Idarmachev Sh.G. The system of continuous monitoring of parameters of cracks in a mountain range on the basis of resistive sensors. Geology and Geophysics of Russian South. 2025. Vol. 15. No. 1. pp. 82–91. DOI: 10.46698/VNC.2025.78.66.007. (In Russ.)
6. Kerimov I.A., Elzhaev A.S. Application of geophysical methods in the study of landslide processes. Geology and Geophysics of Russian South. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 66–83. DOI: 10.46698/VNC.2024.91.39.007. (In Russ.)
7. Svalova V.B. Geoecological risk management and problems of sustainable development of mountain territories. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 129–147. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010. (In Russ.)
8. Yaitskaya N.A., Dzaganii L.M., Brigida V.S. Geoecological hazards in context of climate change of territories of Caucasus subtropical zone. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 118–132. DOI: 10.46698/VNC.2023.54.85.010. (In Russ.)
9. Aslam B., Zafar A., Khalil U. Comparative analysis of multiple conventional neural networks for landslide susceptibility mapping. Natural Hazards. 2023. Vol. 115. pp. 673–707. DOI: 10.1007/s11069-022-05570-x.
10. Bhowmik A., Kumar R., Ranganathaswamy M.K., Kumar, Y.K., Samal P., Mahapatro A. et al. Predictive modeling of the mechanical behavior of 3D-printed polylactic acid/wood composite: Comparison of GEP and ANN methods. AIP Advances. 2025. Vol. 15. Issue 4. DOI: 10.1063/5.0268653.
11. Highland L.M., Bobrowsky P. The landslide handbook – A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular. 2008. Vol. 1325. 129 p.
12. Hristova T., Savov N., Yanev N. Municipal solid waste and non-hazardous waste processing for sustainable circular economy through blockchain. Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2023. Vol. 58. Issue 3. pp. 513–521. DOI: 10.59957/jctm.v58i3.81.
13. Ikram R.M.A., Dehrashid A.A., Zhang B., Chen Z., Le B.N., Moayedi H. A novel swarm intelligence: Cuckoo optimization algorithm (COA) and SailFish optimizer (SFO) in landslide susceptibility assessment. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2023. Vol. 37. pp. 1717–1743.
14. Jaiswal P., van Westen C.J. Use of quantitative landslide hazard and risk information for local disaster risk reduction along a transportation corridor: A case study from Nilgiri district, India. Natural Hazards. 2013. Vol. 65. pp. 887–913. DOI: 10.1007/s11069-012-0404-1.
15. Kapanski A., Hruntovich N.V., Klyuev R.V., Brigida V.S. Identification of easily accessible urban water consumption factors for energy-efficient management of pumping stations. Water Conservation Science and Engineering. 2025. Vol. 10. Art. No. 46. DOI: 10.1007/s41101-025-00372-1.
16. Kara M.E., Seren A., Koroglu F., Alemdag H. Ground-penetrating radar (GPR) tomographic imaging and estimation of the volumetric water content of a viaduct pillar using the simultaneous iterative reconstruction technique algorithm. NDT & E International. 2025. Vol. 156. Art. No. 103448. DOI: 10.1016/j.ndteint.2025.103448.
17. Kaya A., Midilli U.M. Slope stability evaluation and monitoring of a landslide: A case study from NE Turkey. Journal of Mountain Science. 2020. Vol. 17. pp. 2624–2635. DOI: 10.1007/s11629-020-6306-x.

18. Lu K., Li K., Li F. et al. Using electrical resistivity techniques (ERT and SP) for nondestructive detection of seepage channels at the Leitai heritage site, China. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. No. 904. DOI: 10.1038/s41598-025-85368-6.
19. Lucchese L.V., de Oliveira G.G., Pedrollo O.C. Investigation of the influence of nonoccurrence sampling on landslide susceptibility assessment using Artificial Neural Networks. *Catena*. 2021. Vol. 198. Art. No. 105067. DOI: 10.1016/j.catena.2020.105067.
20. Ma W., Dong J., Wei Z., Peng L., Wu Q., Wang X., Wu Y. Landslide susceptibility assessment using the certainty factor and deep neural network. *Frontiers in Earth Science*. 2023. Vol. 10. Art. No. 1091560. DOI: 10.3389/feart.2022.1091560.
21. Pang Y., Yu Z., Xie Z. et al. Study of 3D electrical resistivity tomography in offshore waters. *Doklady Earth Sciences*. 2025. Vol. 523. Art. No. 19. DOI: 10.1134/S1028334X24605698.
22. Prapolski D., Romanovski V. Resent advances in underground water deironing and demanganization: Comprehensive review. *Journal of Water Process Engineering*. 2025. Vol. 70. Art. No. 107089. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107089.
23. Slater L., Binley A. Advancing hydrological process understanding from long-term resistivity monitoring systems. *Wiley Interdisciplinary Reviews Water* 2021. Vol. 8. Issue 3. Art. No. e1513. DOI: 10.1002/wat2.1513.
24. Tsai C.C., Lin C.H. Review and future perspective of geophysical methods applied in nearshore site characterization. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10. Art. No. 344. DOI: 10.3390/jmse10030344.
25. Tutberidze T.V., Ryndin A.V., Besedin T.D. et al. Interrelation between growing conditions in caucasus subtropics and actinidia deliciosa ‘Hayward’ yield for the sustainable agriculture. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. Art. No. 6499 DOI: 10.3390/su17146499.
26. Uyanik O. Estimation of the porosity of clay soils using seismic P- and S-wave velocities. *Journal of Applied Geophysics*. 2019. Vol. 170. Art. No. 103832 DOI: 10.1016/j.jappgeo.2019.103832.
27. Wei L., Zeng Z., Yan J. Factors affecting the stability of Loess Landslides: A review. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Issue 7. Art. No. 2735. DOI: 10.3390/app14072735.
28. Whiteley J.S., Chambers J.E., Uhlemann S., Wilkinson P.B., Kendall J.M. Geophysical monitoring of moisture-induced landslides: A review. *Reviews of Geophysics*. 2019. Vol. 57. Issue 1. pp. 106–145. DOI: 10.1029/2018RG000603.
29. Wu K., Rodriguez G.A., Zajc M., Jacquemin E., Clement M., De Coster A., Lambot S. A new drone-borne GPR for soil moisture mapping. *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 235. Art. No. 111456. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111456.
30. Xu H., Shu B., Zhang Q., Du Y., Zhang J., We T., Xiong G.H., Dai X.L., Wang L. Site selection for landslide GNSS monitoring stations using InSAR and UAV photogrammetry with analytical hierarchy process. *Landslides*. 2024. Vol. 21. pp. 791–805. DOI: 10.1007/s10346-023-02188-31.
31. Zaalishvili V., Burdzieva O., Kanukov A., Zaks T. Eco-Geophysical and Geoecological Factors in Assessing the State of the Geological Environment Based on the Analysis of Spatial Databases of the Territory of the Republic of North Ossetia-Alania. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Art. No. 2644. DOI: 10.3390/app12052644.
32. Zakharikhina L., Lesnikova P., Rogozhina E., Kerimzade V., Gorbunova D. Influence of wind direction on the elemental composition of atmospheric deposition on the Black Sea coast of Sochi, Russia. *Environment and Ecology Research*. 2024. Vol. 12. Issue 5. pp. 514–536. DOI: 10.13189/eer.2024.120505.
33. Zhu W., Biondi E., Li J. et al. Seismic arrival-time picking on distributed acoustic sensing data using semi-supervised learning. *Nature Communications*. 2023. Vol. 14. Art. No. 8192. DOI: 10.1038/s41467-023-43355-3.

УДК 550.389:550.34(479)

DOI: 10.46698/VNC.2025.99.85.001

Оригинальная статья

Аномальное магнитное поле и сейсмичность Большого Кавказа и Восточного Предкавказья

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, Сейсмическая станция «Махачкала»,
Россия, 367010, г. Махачкала, ул. Ахундова, 136

Статья поступила: 02.07.2025, доработана: 05.09.2025, принята к публикации: 09.09.2025

Резюме: Актуальность работы. Поиск новых подходов к разработке моделей формирования сейсмичности Большого Кавказа и его отдельных сейсмоактивных регионов является одним из путей повышения эффективности и достоверности этих исследований. Аномальное магнитное поле наряду с гравитационным является индикатором структуры земной коры. В этом плане предлагается рассмотреть возможности от использования на разных стадиях исследований регионального магнитного поля как индикатора структурных особенностей земной коры. **Цель работы.** Выявление особенностей в характере регионального магнитного поля, отражающих аномалиеобразующие факторы структуры земной коры, оказывающих влияние на процессы современной геодинамики и сейсмичности региона исследований. **Методы исследования.** Сопоставление региональных аномалий магнитного поля по отношению к блоковой структуре консолидированной земной коры и распределению эпицентров сильных (магнитудой $M \geq 5.0$) землетрясений. **Результаты работы.** На основе анализа и синтеза материалов по структуре земной коры, сейсмичности и аномальному магнитному полю региона исследований выявлены общие закономерности и обоснованы направления комплексных исследований геодинамических процессов и современной сейсмичности региона. Отмечена закономерность, что прогибам Восточного Предкавказья, Терско-Каспийскому, Восточно-Манычскому и Кизлярскому, соответствуют положительные региональные аномалии магнитного поля. Это отражает, по-видимому, особенности строения консолидированной коры прогибов, содержащей толщи основных–ультраосновных пород, сформировавшихся в режиме локального растяжения земной коры, в то время как валы формировались в режиме сжатия. Оценена потенциальная информативность регионального магнитного поля для разработки структурно-реологических моделей консолидированной земной коры Большого Кавказа и прилегающих территорий и обоснована необходимость проведения специализированных палеомагнитных исследований.

Ключевые слова: Большой Кавказ, Скифская плита, сейсмичность, магнитное поле, консолидированная кора, тектонический блок, сейсмогенерирующие структуры, сейсмогенный разлом, реология, гравитационное поле.

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

Для цитирования: Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л. Аномальное магнитное поле и сейсмичность Большого Кавказа и Восточного Предкавказья. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 79-91. DOI: 10.46698/VNC.2025.99.85.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.99.85.001

Original paper

Anomalous magnetic field and seismicity of the Greater Caucasus and Eastern Ciscaucasia

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, Seismic station "Makhachkala", 136 Akhundova Str., Makhachkala 367010, Russian Federation

Received: 02.07.2025, revised: 05.09.2025, accepted: 09.09.2025

Abstract: Relevance. Search for new approaches to developing models of seismicity formation in the Greater Caucasus and its separate seismically active regions is one of the ways to increase the efficiency and reliability of these studies. The anomalous magnetic field, along with the gravitational field, is an indicator of the structure of the Earth's crust. In this regard, it is proposed to consider the possibilities of using the regional magnetic field as an indicator of the structural features of the Earth's crust at different stages of research. **Aim.** Identification of features in the character of the regional magnetic field, reflecting anomaly-forming factors of the structure of the earth's crust, influencing the processes of modern geodynamics and seismicity of the research region. **Methods.** Comparison of regional magnetic field anomalies in relation to the block structure of the consolidated Earth's crust and the distribution of epicenters of strong (magnitude $M \geq 5.0$) earthquakes. **Results.** Based on the analysis and synthesis of materials on the structure of the Earth's crust, seismicity and anomalous magnetic field of the studied region, general patterns were revealed and directions of complex studies of geodynamic processes and modern seismicity of the region were substantiated. It was noted that the troughs of the Eastern Ciscaucasia, Tersk-Caspian, East Manych and Kizlyar, correspond to positive regional anomalies of the magnetic field. This apparently reflects the structural features of the consolidated crust of the troughs containing strata of basic-ultramafic rocks formed in the mode of local extension of the Earth's crust, while the swells were formed in the compression mode. The potential information content of the regional magnetic field for the development of structural and rheological models of the consolidated crust of the Greater Caucasus and adjacent territories was estimated and the need for specialized paleomagnetic studies was substantiated.

Keywords: Greater Caucasus, seismicity, magnetic field, consolidated crust, tectonic block, seismogenic structures, seismogenic fault, Scythian plate, rheology, gravitational field.

Acknowledgment: This work was carried out according to the state assignment of the Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, code: FMSM-2022-0013.

For citation: Stogny V.V., Stogny G.A., Ponomareva N.L. Anomalous magnetic field and seismicity of the Greater Caucasus and Eastern Ciscaucasia. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 79-91. DOI: 10.46698/VNC.2025.99.85.001

Введение

Одними из сейсмоопасных регионов России являются Северный Кавказ и Предкавказье. Исследованию современной геодинамики и сейсмичности этих регионов и близлежащих территорий посвящены обобщающие работы [Ананьин, 1977; Лукк, Шевченко, 2019; Рогожин и др., 2014; Уломов и др., 2007 и др.]. Ключевой при этом

является проблема взаимосвязи глубинного строения данных регионов и их сейсмичности, исследованию которой посвящены работы [Гонгадзе, 2016; Горбатилов и др., 2015; Рогожин и др., 2015 и др.]. В качестве сейсмогенерирующих структур обычно рассматриваются тектонические нарушения [Маммадли, 2022; Tibaldi et al., 2020; Tseng et al., 2016].

Основная часть гипоцентров землетрясений Большого Кавказа и прилегающих территорий локализована в пределах консолидированной земной коры [Tibaldi et al., 2020]. С учетом этого была проведена работа, где обосновано, что сейсмогенными являются блоки консолидированной коры и ограничивающие их разломы [Стогний и др., 2024].

Магнитное поле наряду с гравитационным является индикатором структуры земной коры. Цель проведенных исследований заключалась в поиске закономерностей регионального магнитного поля, отражающих аномалиеобразующие факторы структуры земной коры, и оценке их возможного влияния на процессы современной геодинамики и сейсмичности.

Методология и методы исследований

Общая методология исследований основывалась на комплексном анализе геолого-геофизических материалов для достижения основной цели – оценки информативности аномального магнитного поля (АМП) относительно сейсмических процессов региона исследований. Объектом исследования является Большой Кавказ (за исключением Северо-Западного Кавказа, который в силу специфики его геодинамических условий должен рассматриваться в качестве самостоятельного объекта), и близлежащие области, включая Восточное Предкавказье.

В качестве основы для анализа выбрано АМП региона исследований согласно [Карта аномального ..., 2000], отражающего основные его особенности. Сопоставление региональных аномалий АМП выполнялось по отношению к блоковой структуре консолидированной земной коры, разработанной по результатам интерпретации гравитационного поля и глубинных геофизических исследований опорных профилей (МОВ-ОГТ, МОВЗ, МТЗ) [Стогний, Стогний, 2023]. Тектонические нарушения рассматривались как межплитные, межблоковые, внутриблоковые, а блоки – как блоки I и II порядка соответствующих плит (микроплит), Скифской и краевых частей Восточно-Черноморской и Закавказской плит.

Анализ характера сейсмичности региона исследований выполнялся сопоставлением распределения эпицентров сильных (с магнитудой $M \geq 5.0$) землетрясений за период 1900–2022 гг., приведенных в работе [Габсатарова, Зверева, 2023], а также современной сейсмичности за период 2001–2021 гг. для землетрясений с магнитудой $M \geq 3.5$ [Стогний и др., 2024], и особенностей АМП.

Общие результаты выполненных работ получены путем комплексного анализа и синтеза исходных материалов, что явилось основой для выработки рекомендаций по использованию информации, содержащейся в АМП, в моделях формирования сейсмичности региона исследования.

Структура АМП региона исследований

Общий анализ АМП региона исследований в сопоставлении с тектонической структурой фундамента и распределением эпицентров сильных землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$ выполнен в пределах площади 41.5° – 45° с.ш., 41° – 49° в.д., а со-

поставление АМП со структурами Восточного Предкавказья – в пределах площади тектонической карты палеозойского фундамента по [Джабраилов и др., 1993] (43° – 45.5° с.ш., 43° – 46.5° в.д.).

Региональные аномалии АМП в пределах площади исследования имеют интенсивность до ± 300 нТл, а локальные аномалии более высокой интенсивности (как положительные, так и отрицательные) обычно приурочены к массивам вулканогенных и интрузивных пород. Схема АМП региона исследований, распределения эпицентров сильных землетрясений и блоковой делимости консолидированной коры показана на рисунке 1.

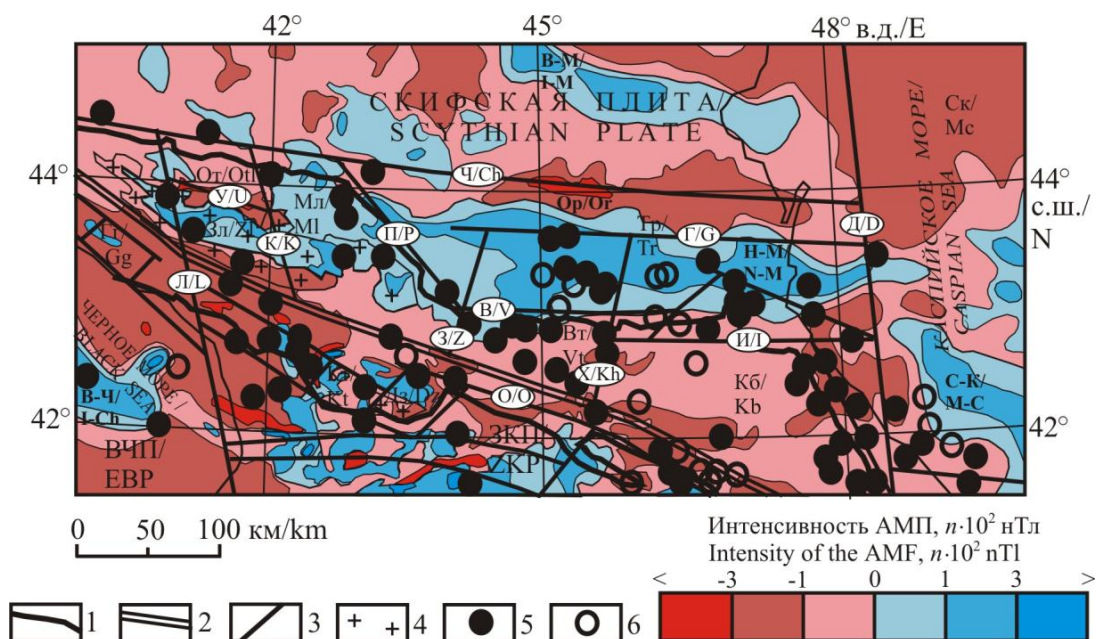


Рис. 1. АМП по [Карта аномального ..., 2000] и эпицентры сильных землетрясений за период 1900–2022 гг. [Габсатарова, Зверева, 2023] на схеме блоковой делимости консолидированной коры Большого Кавказа [Стогний, Стогний, 2023].

1 – границы мегантиклинория Большого Кавказа; 2 – Сването-Алазанский межплитный разлом; 3 – разломы: Л – Лаба-Батумский, У – Урупозеленчукский, Ч – Черкесско-Кизлярский, Г – Грозненский, К – Верхнекубанский, П – Пятигорский, З – Згитский, В – Владикавказский, Х – Халкилойский, И – Известняковый, Д – Дербент-Ленкоранский, О – Они-Шекийский; 4 – выходы протерозойских метаморфических пород и палеозойских гранитов Центрального сегмента и Дзирульского массива; 5, 6 – эпицентры сильных (с магнитудой $M \geq 5.0$) землетрясений: 5 – за период 1900–2000 гг., 6 – за период 2001–2022 гг.. Региональные аномалии магнитного поля: положительные – В-Ч – Восточно-Черноморская, Н-М – Нальчик-Махачкалинская, В-М – Восточно-Маньчская, С-К – Средне-Каспийская; отрицательные – Ор – Ортотюбинская. Литосферные плиты и микроплиты:

ВЧП – Восточночерноморская, ЗКП – Закавказская. Блоки консолидированной коры: Зл – Зеленчукский, От – Отраднинский, Мл – Малкинский, Тр – Терский, Вм – Верхнетерский, Кб – Кубачинский, Гз – Гагринский, Км – Кутаисский, Дз – Дзирульский, Ск – Среднекаспийский / Fig. 1. AMF according to [Map of the anomalous ..., 2000] and epicenters of strong earthquakes for the period 1900–2022 [Gabsatarova, Zvereva, 2023] on the scheme of the block divisibility of the consolidated crust [Stogny, Stogny, 2023] of the Greater Caucasus.

1 – boundaries of the Greater Caucasus meganticlinorium; 2 – Svaneti-Alazani interplate fault; 3 – faults: L – Laba-Batumi, U – Urupozelenchuk, Ch – Cherkessk-Kizlyar, G – Groznensky, K – Verkhnekuban, P – Pyatigorsky, Z – Zgitsky, V – Vladikavkazsky, Kh – Khalkiloisky, I – Izvestnyakovy, D – Derbent-Lenkoran, O – Onishekian; 4 – outcrops of Proterozoic metamorphic rocks and Paleozoic granites of the Central segment and the Dziruli massif; 5, 6 – epicenters of strong (with a magnitude of $M \geq 5.0$) earthquakes: 5 – for the period 1900–2000, 6 – for the period 2001–2022.

Regional magnetic field anomalies:

positive – I-Ch – East Black Sea, N-M – Nalchik-Makhachkalinskaya, I-M – East-Manychskaya, M-C – Middle-Caspian; negative – Or – Ortotyubinskaya. Lithospheric plates and microplates: EBP – East Black Sea, ZKP – Transcaucasian. Blocks of consolidated crust: Zl – Zelenchuksky, Ot – Otradninsky, Ml – Malkinsky, Tr – Tersky, Vt – Verkhnetersky, Kb – Kubachinsky, Gg – Gagrynsky, Kt – Kutaisky, Dz – Dzirulsky, Mc – Middle-caspian

Скифская плита. В северной части региона исследований выделяется протяженная (до 200 км) Восточно-Манычская положительная магнитная аномалия интенсивностью до 300 нТл, имеющая северо-западное простирание. Южнее, субпараллельно этой аномалии, выделяется Ортотюбинская отрицательная магнитная аномалия интенсивностью до -300 нТл, расположенная в осевой части Черкесско-Кизлярского разлома. Данная аномалия на юге граничит с Нальчик-Махачкалинской региональной положительной (интенсивностью до 300 нТл) магнитной аномалией субширотного простирания протяженностью до 400 км, локализованной в пределах Терского блока I порядка консолидированной коры, северным ограничением которого является Черкесско-Кизлярский разлом, южным – Владикавказский и Известняковый разломы, а западное и восточное ограничения представлены соответственно Пятигорским и Дербент-Ленкоранским разломами. Расположенные южнее Терского блока Верхнетерский и Кубачинский блоки консолидированной коры, южное ограничение которых представлено Сването-Алазанским межплитным разломом, представляющим собой восточный фрагмент Большееавказского разлома, характеризуются слабоаномальным отрицательным магнитным полем с отдельными отрицательными аномалиями интенсивностью - 100 нТл.

Западнее Терского блока по данным интерпретации гравитационного поля был выделен Эльбрусский блок консолидированной коры [Стогний, Стогний, 2023], ограниченный с севера и юга соответственно Черкесско-Кизлярским разломом и Сването-Алазанским межплитным разломом, а с востока и запада – Пятигорским и Лаба-Батумским разломами. На основе магнитного поля этот блок разделен на три блока II порядка, на востоке это Малкинский блок, граничащий по Верхнекубанскому разлому с расположенными западнее Зеленчукским и Отраднинским блоками. Малкинский блок в пределах основной своей части (за исключением южной) имеет повышенное магнитное поле. Субгоризонтальная граница между Зеленчукским и Отраднинским блоками проведена по Урупозеленчукскому разлому, выделенному по одноименной отрицательной аномалии магнитного поля, по морфологии подобной Ортотюбинской магнитной аномалии, приуроченной к Черкесско-Кизлярскому разлому которая, возможно, имеет такую же природу. Отраднинский блок, расположенный к северу от Урупозеленчукского разлома, имеет магнитное поле низкоинтенсивное и преимущественно отрицательное. В пределах северной части Зеленчукского блока контуры положительной магнитной аномалии интенсивностью до 300 нТл примерно соответствуют локализованному здесь крупному массиву гранитоидов, а в южной части – такой же интенсивности отрицательное магнитное поле, приуроченное к расположенному южнее второму массиву гранитоидов. Это может свидетельствовать, на наш взгляд, об их формировании в различные магнитные эпохи, различающиеся полярностью земного магнитного поля.

Восточная окраина Скифской плиты представлена Среднекаспийским блоком, западной границей которого является Дербент-Ленкоранский разлом. В акватории Среднего Каспия выделяется одноименная Средне-Каспийская региональная положительная магнитная аномалия.

Восточночерноморская микроплита. В пределах региона исследований Восточночерноморская микроплита представлена своим северо-восточным флангом, граничащим по Сването-Алазанскому межплитному разлому со Скифской плитой. В восточной части акватории Черного моря выделяется одноименная ей положительная Восточно-Черноморская региональная магнитная аномалия.

Закавказская микроплита. Северный фланг Закавказской микроплиты граничит по Сването-Алазанскому межплитному разлому со Скифской плитой, АМП в его пределах имеет сложный характер, отражающий неоднородность земной коры. Следует отметить, что эта неоднородность проявляется и в высокоплотных блоках II порядка, Дзирульском и Кутаисском, где отмечаются локальные магнитные аномалии (в Дзирульском блоке в его северной части).

Сейсмичность региона исследований

В данном разделе охарактеризованы общие закономерности распределения эпицентров сильных землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$ согласно схеме [Габсатарова, Зверева, 2023] (см. рис. 1) и их возможной связи с особенностями строения земной коры, отражающихся в АМП.

Скифская плита. За исследуемый период (с 1900 г.) сильных землетрясений севернее Черкесско-Кизлярского разлома не зарегистрировано, а сам этот разлом, по видимому, является сейсмогенным, в зоне его влияния зарегистрировано несколько сильных землетрясений. В пределах Терского блока консолидированной коры основная часть эпицентров землетрясений локализована в пределах Нальчик-Махачкалинской региональной положительной магнитной аномалии и на ее границах. Довольно высокой сейсмической активностью отмечаются Малкинский и Зеленчукский блоки, в пределах которых АМП высокой интенсивности, в Отраднинском блоке, характеризующемся слабым отрицательным магнитным полем, эпицентры крупных землетрясений не зарегистрированы. Также практически асейсмичной является основная часть Кубачинского блока, эпицентры крупных землетрясений локализованы в его восточной и западной частях, при этом отмечается их приуроченность к интенсивным отрицательным аномалиям магнитного поля. Верхнетерский блок, представляющий собой переходную зону Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа, характеризуется довольно высокой сейсмичностью.

Обращает на себя внимание приуроченность значительной части эпицентров сильных землетрясений, в том числе произошедших в XXI веке, к южной границе Средне-Каспийской региональной положительной магнитной аномалии. Согласно [Вольфман и др., 2025], для Среднекаспийского региона характерны как обстановки сжатия, так и обстановки растяжения (и транстенсии) коры в ЮЮЗ–ССВ направлении. Очаги землетрясений, обусловленные обстановками растяжения, сосредоточены, главным образом, в акватории Каспийского моря, на границе областей с корой континентального и субокеанического типа, где они в количественном и энергетическом отношении превалируют над очагами, сформировавшимися в условиях сжатия.

Восточночерноморская микроплита. Было зарегистрировано три сильных землетрясения в пределах акватории, два из них произошли в XX веке, их эпицентры приурочены к Восточно-Черноморской магнитной аномалии. Эпицентр третьего, Восточно-Черноморского землетрясения (23.12.2012, $M_{w\text{per}}=6.0$), описание которого приведено в [Габсатарова и др., 2018], располагался в 60 км южнее

г. Сухуми и локализован на границе с северным апофизом Восточно-Черноморской магнитной аномалии.

Закавказская микроплита. В пределах северного фланга Закавказской микроплиты АМП, как отмечалось, имеет сложный характер. Наиболее сейсмоактивными при этом являются высокоплотные блоки консолидированной коры, в их числе Дзирульский и Кутаисский. Следует отметить, что эпицентр одного из сильнейших в пределах Большого Кавказа Рачинского землетрясения (29.04.1991, $M_w = 6.9$, $H=7$ км) приурочен к северной части Дзирульского блока и расположен в пределах локальной положительной магнитной аномалии. Сейсмогенерирующими в этой области являются и разломы, один из самых сейсмоактивных – Они-Шекийский, субпараллельный Сването-Алазанскому межплитному разлому.

В таблице 1 приведены данные по количеству эпицентров землетрясений с $M \geq 5.0$ в пределах блоков Скифской плиты и изученных частей Восточно-Черноморской и Закавказской плит, попадающих в контуры интенсивных магнитных аномалий и их границ, а также их относительное количество.

Таблица 1 / Table 1

Количество эпицентров землетрясений с $M \geq 5.0$ в контурах интенсивных магнитных аномалий тектонических структур консолидированной коры региона исследований /
The number of earthquakes epicenters with $M \geq 5.0$ in the contours of intense magnetic anomalies of the consolidated crust tectonic structures of the study region

Литосферная плита, блок/ Lithospheric plate, block	Количество землетрясений с $M \geq 5.0$ / Number of earthquakes with $M \geq 5.0$		
	Всего/ Total	В АМП/ In AMP	%
Блоки Скифской плиты:/ Blocks of the Scythian plate	91	59	65
- Зеленчукский/ Zelenchuksky	3	2	67
- Малкинский/ Malkinsky	6	6	100
- Терский/ Tersky	23	18	78
- Верхнетерский/ Verkhnetersky	8	4	50
- Кубачинский/ Kubachinsky	14	6	43
- Среднекаспийский/ Middle-caspian	9	5	56
Восточно-Черноморская плита/ East Black Sea plate	3	3	100
Закавказская плита/ Transcaucasian plate	16	10	62
Всего/ Total	164	108	66

Структура кристаллического фундамента и АМП Восточного Предкавказья

Для Восточного Предкавказья выполнено сопоставление АМП со структурной картой фундамента [Джабраилов и др., 1993], построенной по данным бурения и сейсморазведки МОВ-ОГТ, проведенных в 1970–1980 гг. (рис. 2). Основные тектонические структуры фундамента Восточного Предкавказья – Терско-Каспийский краевой прогиб, Ногайско-Тарумовский сложный вал, Восточно-Манычский и Кизлярский прогибы.

Терско-Каспийский краевой прогиб. Контуры Терско-Каспийского краевого прогиба, южным ограничением которого являются складчато-надвиговые структуры Большого Кавказа, практически совпадают с Нальчик-Махачкалинской региональной положительной магнитной аномалией. Глубина фундамента позднепалеозойского возраста (средний девон–верхний карбон) Терско-Каспийского прогиба изменяется от 6 до 10–12 км, для него в целом характерны пологий северный платформенный борт с наклоном слоев до 10° и крутой, сильно дислоцированный, осложненный разрывами и элементами диапиризма южный складчатый борт [Тектоника ..., 2009].

Как было показано выше, к контурам Нальчик-Махачкалинской региональной магнитной аномалии приурочена значительная часть эпицентров землетрясений (с $M \geq 5.0$), произошедших здесь после 1900 г. Следует также отметить, что к центральной части прогиба приурочена область распространения верхнемантийных землетрясений. В работе [Габсатарова, 2024] выделены 5 центроидов расположения верхнемантийных землетрясений (их контур вынесен на рис. 2), глубины гипоцентров которых увеличиваются от $h=79$ км в южной части, где фундамент залегает максимально глубоко, до $h=146$ км в северной части области.

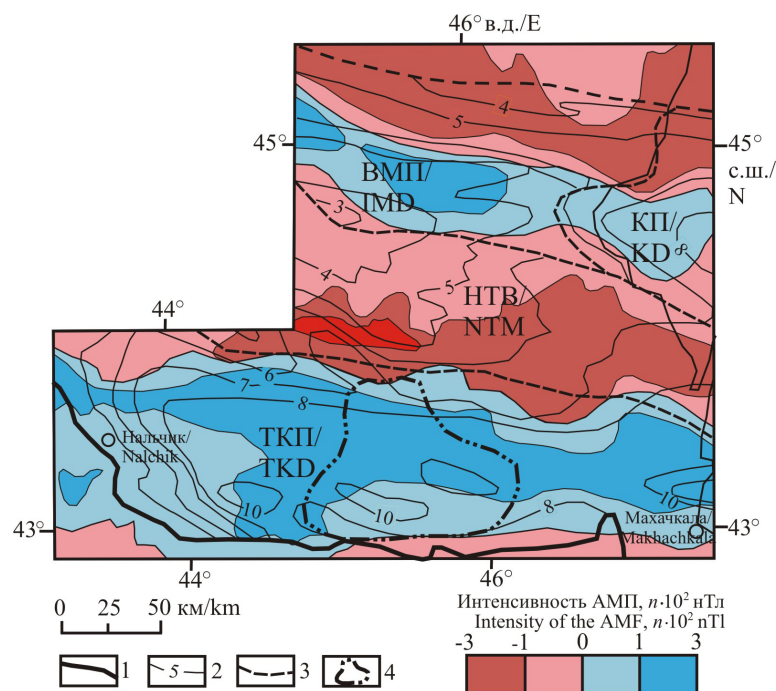


Рис. 2. АМП по [Карта аномального ..., 2000] и контур верхнемантийных землетрясений по [Габсатарова, 2024] на схеме структуры палеозойского фундамента Восточного Предкавказья [Джабраилов и др., 1993]. 1 – северная граница мегантиклинория Большого Кавказа; 2 – изогипсы поверхности фундамента (в км); 3 – границы тектонических структур (ТКП – Терско-Каспийский краевой прогиб, НТВ – Ногайско-Тарумовский сложный вал, ВМП – Восточно-Манычский прогиб, КП – Кизлярский прогиб); 4 – Терско-Сунженский район верхнемантийных землетрясений по [Габсатарова, 2024] /

Fig. 2. AMF according to [Map of anomalous ..., 2000] and the contour of upper mantle earthquakes according to [Gabsatarova, 2024] on the scheme of the structure of the Eastern Ciscaucasia Paleozoic basement Dzhabrailov et al., 1993]. 1 – northern boundary of the Greater Caucasus meganticlinorium; 2 – basement surface isohypses (in km); 3 – boundaries of tectonic structures (TKD – Tersko-Caspian foredeep, NTM – Nogai-Tarumovsky complex swell, IMD – East Manych deflection, KD – Kizlyar deflection; 4 – Tersko-Sunzhensky region of upper mantle earthquakes according to [Gabsatarova, 2024]

Ногайско-Тарумовский сложный вал. Глубина фундамента Ногайско-Тарумовского вала увеличивается в субширотном направлении с 4 до 7 км, а его контуры практически совпадают с областью отрицательных магнитных аномалий.

Восточно-Манычский прогиб. Северной границей прогиба является кряж Карпинского, а в его южной части располагается Восточно-Манычская региональная положительная магнитная аномалия.

Кизлярский прогиб. Глубина фундамента Кизлярского прогиба, расположенного в западной акватории Каспийского моря, составляет 6–8 км, его контурам соответствует восточная часть Восточно-Манычской региональной положительной магнитной аномалии.

Обсуждение результатов

Проведенные исследования показали, что для Большого Кавказа и близлежащих областей 2/3 эпицентров сильных ($M \geq 5.0$) землетрясений, зарегистрированных за период 1900–2022 гг. находятся в пределах контуров интенсивных региональных магнитных аномалий или на их границах. Для метаморфических и магматических пород их магнитные свойства возрастают с повышением основности пород [Физические ..., 1984], в то же время, возрастают и их реологические свойства [Ranalli, 1987], то есть породы становятся более «жесткими». В определенном смысле они становятся «аккумуляторами» тектонических напряжений, которые разряжаются на реологических неоднородностях консолидированной земной коры. Учитывая это, следует ожидать, что используя при моделировании данные о физических (в т.ч. реологических) неоднородностях земной коры, можно повысить эффективность реологического моделирования как основы геодинамических исследований, методика и первые результаты которых для физико-геологических условий Большого Кавказа показаны в [Стогний, Стогний, 2024]. Данная методика может быть применена и для создания геодинамических моделей основных сейсмогенных районов Большого Кавказа, естественно, при увеличении детальности исследований.

Как отмечалось, выделенным в структуре кристаллической коры Восточного Предкавказья прогибам [Джабраилов и др., 1993], Терско-Каспийскому, Восточно-Манычскому и Кизлярскому, соответствуют положительные региональные аномалии магнитного поля, а Ногайско-Тарумовского вала – отрицательные. Это отражает, по-видимому, особенности строения прогибов земной коры, содержащей толщи основных–ультраосновных пород, сформировавшихся в разные эпохи в режиме локального растяжения земной коры, в то время как валы формировались в режиме сжатия. Проведение целенаправленных палеомагнитных исследований, методика которых хорошо известна [Piper, 1987], может дать материал к построению моделей эволюции земной коры данного региона.

Для выявления характера деформационного режима обычно используются данные решений механизмов очагов землетрясений. Для Среднекаспийского региона по данным [Вольфман, Колесникова, 2024] характерны фокальные механизмы очагов взбросового и сбросового и близких к ним в структурно-кинематическом отношении взбросо-сдвигового и сбросо-сдвигового типов, определяющих кинематические обстановки соответственно регионального сжатия и растяжения субмеридионального северо-северо-восточного кавказского направления.

Одним из проблемных является вопрос регионального механизма формирования напряженно-деформированного состояния земной коры. Образование ороге-

на Большого Кавказа в [Гончаров, Разницын, 2014] рассматривается как результат мелкомасштабной конвекции в верхней мантии. По нашему мнению, условия для реализации глубокофокусных землетрясений Терско-Сунженского района формируются за счет флюидного потока ячейки мелкомасштабной конвекции в верхней мантии Терско-Каспийского прогиба. В этих условиях в результате нарушения механического и термического равновесия возникают условия локального растяжения. Так, по данным [Габсатарова, 2024] механизмы очагов верхнемантийных землетрясений с глубинами более 70 км в основном имеют сбросовый тип движения, а для коровых землетрясений преобладает взброс, характерный для условий сжатия. Возможно, что в этом случае сжатие происходит в земной коре при локальном растяжении в верхней мантии.

Таким образом, анализ и синтез материалов по структуре консолидированной земной коры, сейсмичности и АМП региона исследований позволили выявить некоторые общие закономерности и обосновать направления комплексных исследований геодинамических процессов и сейсмичности региона.

Выводы

1. В результате проведенных исследований выполнен анализ потенциальной информативности магнитного поля для разработки структурно-реологических моделей консолидированной земной коры Большого Кавказа и прилегающих территорий, а также его связи с закономерностями проявления сейсмичности.

2. Для Восточного Предкавказья показано, что Терско-Каспийскому, Восточно-Маньчжурскому и Кизлярскому прогибам соответствуют положительные региональные аномалии магнитного поля, а Оросалинская отрицательная аномалия магнитного поля приурочена к Черкесско-Кизлярскому разлому, ограничивающему Терско-Каспийский краевой прогиб с севера. Это может являться основанием для проведения целенаправленных палеомагнитных исследований изучения альпийской геодинамики и ее эволюции во времени.

3. При обосновании геодинамических моделей формирования напряженно-деформированного состояния земной коры южного фланга Скифской плиты и ее эволюции в качестве стартовой может быть принята модель мелкомасштабной конвекции в верхней мантии.

Литература

1. Ананьин И.В. Сейсмичность Северного Кавказа. – М.: Наука, 1977. – 148 с.
2. Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я. Некоторые особенности сейсмотектоники Каспийского региона. // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Т. XIV. – М.: ИИЕТ РАН, 2024. – С. 228–233.
3. Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я., Калинюк И.В. Инверсионный характер кинематических обстановок сейсмогенеза Среднекаспийского региона. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 2. – С. 73–86. DOI: 10.46698/VNC.2025.67.30.001.
4. Габсатарова И.П. Сейсмичность в Терско-Каспийском прогибе: триггерные эффекты и механизмы очагов. // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Т. XIV. – М.: ИИЕТ РАН, 2024. – С. 239–244.
5. Габсатарова И.П., Зверева А.С. Сейсмический мониторинг Северного Кавказа в первую четверть XXI века. // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Т. XIII. – М.: ИИЕТ РАН, 2023. – С. 257–264.
6. Габсатарова И.П., Карпович Е.А., Королецки Л.И., Войтова А.С., Каменская

ОЛ. Восточно-Черноморское землетрясение 23 декабря 2012 г. с $KP=14.1$, $Mw_{\text{рег}}=6.0$, $Mw_{\text{GCMT}}=5.8$, $0p=7-8$ (Чёрное море, Абхазия). // Землетрясения Северной Евразии. Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 433–443.

7. 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.

8. Гончаров М.А., Разницын Ю.Н. Четыре разномасштабных фактора новейшего орогенеза Евразии. // Тектоника складчатых поясов Евразии: сходство, различие, характерные черты новейшего горообразования, региональные обобщения. Т. 1. – М.: ГЕОС, 2014. – С. 85–89.

9. Горбатилов А.В., Рогожин Е.А., Степанова М.Ю., Харазова Ю.В., Андреева Н.В., Передерин Ф.В., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Дзеранов Б.В., Дзедоев Б.А., Габараев А.Ф. Особенности глубинного строения и современной тектоники Большого Кавказа в Осетинском секторе по комплексу геофизических данных. // Физика Земли. – 2015. – № 1. – С. 28–39.

10. Джабраилов М.О., Коновалов В.И., Кононов Н.И., Пчелинцев П.Е., Талалаев В.Д. Новые данные о глубинной тектонике Восточного Предкавказья. // Геология нефти и газа. – 1993. – № 1.

11. Карта аномального магнитного поля (Т) России, сопредельных государств (в границах бывшего СССР) и прилегающих акваторий. Масштаб 1 : 5 000 000 / Гл. редактор Т.П. Литвинова. – СПб.: ВСЕГЕИ, – 2000.

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

13. Маммадли Т.Я. Анализ сейсмической активности глубинных разломов с использованием метода определения сейсмогенерирующих зон: оценка зон сейсмической опасности территории Азербайджана. // Геотектоника. – 2022. – № 2. – С. 95–104.

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

15. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатилов А.В. Эндогенные опасности Большого Кавказа. – М.: ИФЗ РАН, 2014. – 256 с.

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 В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л., Гросс С.С. Структура консолидированной земной коры и сейсмичность Центрального сегмента Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 54–65. DOI: 10.46698/VNC.2024.52.34.006.

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. Тектоника южного обрамления Восточно-Европейской платформы. / Под редакцией В.Е. Хаина, В.И. Попкова. – Краснодар: КубГУ, 2009. – 213 с.

20. Уломов В.И., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Полякова Т.П., Шумилина Л.С. К оценке сейсмической опасности на Северном Кавказе. // Физика земли. – 2007. – № 7. – С. 31–45.

21. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. / Под редакцией Н.Б. Дортман. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 455с.

22. Piper J.D.A. Paleomagnetism and the Continental Crust. – John Wiley, New York, 1987. – 434 p.

23. Ranalli G. Rheology of the Earth. London: Allen and Unwin, 1987. – 336 p.
24. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T., Bonali F.L., Russo E., Kadirov F., Yetirmishli G., Kazimova S. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2020. – Vol. 188. – pp. 1–18.
25. Tseng T.-L., Hsu H.-C., Jian P.-R., Huang B.-S., Hu J.-C., Chung S.-L. Focal mechanisms and stress variations in the Caucasus and Northeast Turkey from constraints of regional waveforms. // *Tectonophysics*. – 2016. – Vol. 691. – pp. 362–374.

References

1. Ananyin I.V. Seismicity of the North Caucasus. Moscow. Nauka. 1977. 148 p. (In Russ.)
2. Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya. Some features of seismotectonics of the Caspian region. In: *Modern Problems of Geology, Geophysics and Geoecology of the North Caucasus*. Vol. XIV. Moscow. IIET RAS. 2024. pp. 228–233. (In Russ.)
3. Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya., Kalinyuk I.V. Inversion nature of kinematic settings of seismogenesis in the Middle Caspian region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 2. pp. 73–86. DOI: 10.46698/VNC.2025.67.30.001. (In Russ.)
4. Gabsatarova I.P. Seismicity in the Terek-Caspian Trough: Trigger effects and focal mechanisms. In: *Modern Problems of Geology, Geophysics and Geoecology of the North Caucasus* Vol. XIV. Moscow. IIET RAS. 2024. pp. 239–244. (In Russ.)
5. Gabsatarova I.P., Zvereva A.S. Seismic monitoring of the North Caucasus in the first quarter of the 21st century. In: *Modern Problems of Geology, Geophysics and Geoecology of the North Caucasus*. Vol. XIII. Moscow. IIET RAS. 2023. pp. 257–264. (In Russ.)
6. Gabsatarova I.P., Karpovich E.A., Koroletsky L.I., Voitova A.S., Kamenskaya O.L. East Black Sea earthquake on December 23, 2012 with $KR=14.1$, $M_{w_{per}}=6.0$, $M_{w_{GCMT}}=5.8$, $0p=7-8$ (Black Sea, Abkhazia). *Earthquakes of Northern Eurasia*. Issue 21 (2012). Obninsk. FRC GS RAS. 2018. pp. 433–443. (In Russ.)
7. Gongadze S.A. Deep structure of the Greater Caucasus based on geophysical data 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.)
8. Goncharov M.A., Raznitsyn Yu.N. Four different-scale factors of the latest orogenesis of Eurasia. *Tectonics of the folded belts of Eurasia: similarities, differences, characteristic features of the latest mountain building, regional generalizations*. Vol. 1. Moscow. GEOS. 2014. pp. 85–89. (In Russ.)
9. Gorbatikov A.V., Rogozhin E.A., Stepanova M.Yu., Kharazova Yu.V., Andreeva N.V., Perederin F.V., Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Dzeboev B.A., Gabaraev A.F. Features of the deep structure and modern tectonics of the Greater Caucasus in the Ossetian sector based on a complex of geophysical data. *Physics of the Earth*. 2015. No. 1. pp. 28–39. (In Russ.)
10. Dzhabrailov M.O., Konovalov V.I., Kononov N.I., Pchelintsev P.E., Talalaev V.D. New data on the deep tectonics of the Eastern Ciscaucasia. *Geology of Oil and Gas*. 1993. No. 1. (In Russ.)
11. Map of the anomalous magnetic field (T) of Russia, adjacent states (within the borders of the former USSR) and adjacent waters. Scale 1: 5,000,000. Ed. T.P. Litvinova. Saint Petersburg. VSEGEI. 2000.
12. 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.)
13. Mammadli T.Ya. Analysis of seismic activity of deep faults using the method of determining seismogenic zones: assessment of seismic hazard zones of the territory of Azerbaijan. *Geotectonics*. 2022. No. 2. pp. 95–104. (In Russ.)
14. Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu., Ovsyuchenko A.N., Andreeva N.V., Kharazova Yu.V. Structure and modern geodynamics of the meganticlinorium of the Greater Caucasus in the light of new data on the deep structure. *Geotectonics*. 2015. No. 2. pp. 36–49. (In Russ.)

15. Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Lutikov A.I., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Gorbatiykov A.V. Endogenous hazards of the Greater Caucasus. Moscow. IPE RAS. 2014. 256 p. (In Russ.)
16. Stogny V.V., Stogny G.A. Deep structure and rheological stratification of the Earth's crust of the Central segment of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 6–20. DOI: 10.46699/VNC.2024.37.52.001. (In Russ.)
17. Stogny V.V., Stogny G.A., Ponomareva N.L., Gross S.S. Structure of Earth's consolidated crust and seismicity of the Greater Caucasus Central segment. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 54–65. DOI: 10.46698/VNC.2024.52.34.006 (In Russ.)
18. Stogny G.A., Stogny V.V. The Scythian plate southern boundary in the system of block divisibility consolidated crust of the Greater Caucasus Central and Eastern segments. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2023.96.83/001. (In Russ.)
19. Tectonics of the southern framing of the East European platform. Eds. V.E. Khain, V.I. Popkov. Krasnodar. Kuban State University. 2009. 213 p. (In Russ.)
20. Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Polyakova T.P., Shumilina L.S. On the assessment of seismic hazard in the North Caucasus. *Physics of the Earth*. 2007. No. 7. pp. 31–45. (In Russ.)
21. Physical properties of rocks and minerals (petrophysics). *Geophysics Handbook*. Ed. N.B. Dortman. 2nd ed. revised and enlarged. Moscow. Nedra. 1984. 455 p. (In Russ.)
22. Piper J.D.A. *Paleomagnetism and the Continental Crust*. John Wiley. New York. 1987. 434 p.
23. Ranalli G. *Rheology of the Earth*. London. Allen and Unwin. 1987. 336 p.
24. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T., Bonali F.L., Russo E., Kadirov F., Yetirmishli G., Kazimova S. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020. Vol. 188. pp. 1–18.
25. Tseng T.-L., Hsu H.-C., Jian P.-R., Huang B.-S., Hu J.-C., Chung S.-L. Focal mechanisms and stress variations in the Caucasus and Northeast Turkey from constraints of regional waveforms. *Tectonophysics*. 2016. Vol. 691. pp. 362–374.

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2025.73.90.001

Оригинальная статья

О параметрах сильных движений грунта, очагах землетрясений и иерархии структур геологической среды

Ю.К. Чернов 

Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а,
e-mail: chenta-26@mail.ru, cgi_ras@mail.ru

Статья поступила: 02.08.2025, доработана: 10.09.2025, принята к публикации: 13.09.2025

Резюме: Цель исследований. Пополнение данных о сильных движениях грунта для получения дополнительных возможностей при оценках сейсмической опасности территорий и изучении очагов землетрясений. **Актуальность работы.** В настоящее время при исследованиях движений грунта при сильных землетрясениях, в большинстве случаев, рассматриваются характеристики ускорений колебаний. При этом акцент делается на параметры, связанные с интенсивностью колебаний – амплитудным уровнем, спектральными ускорениями и т.п. Другим же кинематическим (скоростям, смещениям) и динамическим (периодам, длительностям) характеристикам уделяется меньше внимания. Однако такие данные могут существенным образом влиять на оценки сейсмической опасности и риска, а также быть полезными при изучении, например, строения и работы очагов землетрясений и других фундаментальных аспектов сейсмологии. Поэтому, настоящее исследование, направленное на пополнение имеющейся по данному вопросу информации, представляется своевременным и полезным. **Объект исследования.** Эмпирические функции изменения с расстоянием периодов и длительностей интенсивных ускорений, скоростей и смещений колебаний грунта и возможное строение очагов землетрясений. **Методы исследования.** Комплексный статистический анализ большого количества инструментальных записей ускорений, скоростей и смещений грунта при землетрясениях разной величины и удаленности в сочетании с данными об очагах землетрясений. Результирующие зависимости параметров колебаний грунта от расстояния строились методом подбора. Построения сделаны отдельно для периодов и длительностей колебаний, для землетрясений разных магнитуд, расстояний и для разных кинематических характеристик. Полученные оценки использованы для гипотетических оценок размеров и способов работы источников колебаний (очагов землетрясений) исходя из представлений о дислокационных моделях очагов и когерентности (не когерентности) очагового излучения. **Результаты исследования.** Получены уточненные варианты оценок наиболее вероятных значений периодов колебаний с максимальной амплитудой и длительностей основной фазы колебательных ускорений, скоростей и смещений при разных магнитудах землетрясений и расстояниях до очага. На основании полученных оценок периодов и длительностей колебаний грунта в ближних зонах землетрясений сделаны предположения о размерах, строении и способах работы соответствующих очагов землетрясений (источников) и составляющих их фрагментов (субисточников). Показано, что соотношения между размерами очагов землетрясений разных магнитуд, а также их отдельными составляющими подчиняются общим законам иерархии структур по М.А. Садовскому.

Ключевые слова: землетрясения, сильные движения грунта, сейсмическая опасность, очаги землетрясений, иерархия структур геологической среды.

Для цитирования: Чернов Ю.К. О параметрах сильных движений грунта, очагах землетрясений и иерархии структур геологической среды. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 92-109. DOI: 10.46698/VNC.2025.73.90.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.73.90.001

Original paper

About the parameters of strong ground motions, earthquake foci and hierarchies of the geological environment structure

Yu.K. Chernov 

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation,
e-mail: chenta-26@mail.ru, cgi_ras@mail.ru

Received: 02.08.2025, revised: 10.09.2025, accepted: 13.09.2025

Abstract: Aim. Updating data on strong ground motions to provide additional opportunities for seismic hazard assessment of territories and studying earthquake foci. **Relevance.** Currently, when studying ground motions during strong earthquakes, in most cases, the characteristics of vibration accelerations are considered. At the same time, the emphasis is on the parameters related to the intensity of the vibrations – the amplitude level, spectral accelerations, etc. Other kinematic (velocities, displacements) and dynamic (periods, durations) characteristics receive less attention. However, such data can significantly influence estimates of seismic hazard and risk, as well as be useful in studying, for example, the structure and operation of earthquake foci and other fundamental issues of seismology. Therefore, this study that is aimed at updating the information available on this issue, seems timely and useful. **The object of the research.** Empirical functions of changes in periods and durations of intense accelerations, velocities and displacements of ground motions with distance, and the possible structure of earthquake foci. **Methods.** Comprehensive statistical analysis of a large number of instrumental records of accelerations, velocities, and displacements of the ground during earthquakes of various sizes and distances, combined with data on earthquake sources. The resulting dependences of the ground motion parameters on the distance were constructed by the selection method. The compositions are made separately for periods and durations of motions, for earthquakes of different magnitudes, distances and for different kinematic characteristics. The estimates obtained were used for hypothetical estimates of the size and operation of sources of motions (earthquake foci) based on their ideas about dislocation models of foci and coherence (non-coherence) of focal radiation. **Results.** Refined versions of estimates of the most probable values of vibration periods with maximum amplitude and durations of the main phase of accelerations of vibrations, velocities and displacements at different earthquake magnitudes and distances to the source have been obtained. Based on the estimates of the periods and durations of ground vibration in the near zones of earthquakes, assumptions are made about the size, structure and methods of operation of the corresponding earthquake foci (sources) and their constituent fragments (sub-sources). It is shown that the relationships between the sizes of earthquake foci of different magnitudes, as well as their individual components obey the general laws of the hierarchy of structures according to M.A. Sadovsky.

Keywords: earthquakes, strong ground motions, seismic hazard, earthquake foci, hierarchies of the geological environment structure.

For citation: Chernov Yu.K. About the parameters of strong ground motions, earthquake foci and hierarchies of the geological environment structure. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 92-109. DOI: 10.46698/VNC.2025.73.90.001

Введение

Так как именно движения грунта во время сильных землетрясений представляют наибольшую опасность данного природного явления, они традиционно являются основным объектом инженерно-сейсмологических исследований. Информация о сильных движениях грунта (СДГ) также необходима для изучения первопричин их возникновения, в том числе образования и развития очагов землетрясений.

В настоящее время основным источником достоверной информации о СДГ являются эмпирические данные, получаемые путем инструментальной регистрации сотрясений грунта при реальных ощутимых и сильных землетрясениях, осуществляемой при помощи специально разработанных для этих целей приборов. Для удобства исследований и дальнейшего использования полученных результатов, во многих случаях первичные записи СДГ (акселерограммы, велосигаммы, сейсмограммы) параметризуются и представляются в виде отдельных динамических характеристик. Количество таких характеристик (параметров) может быть большим. Обычно же, в инженерно-сейсмологических исследованиях рассматривается ограниченный набор параметров колебаний. Как правило, это пиковые амплитуды, периоды колебаний с максимальной амплитудой, длительности основной фазы, спектры, форма колебаний и некоторые другие характеристики. При этом в большинстве случаев акцент делается на оценки параметров ускорений, а среди них – на амплитуды и спектры колебаний. Другим же кинематическим (скоростям, смещениям) и динамическим (периодам, длительностям) характеристикам уделяется меньше внимания, о чем можно судить, например, по работам [Медведев, 1962; Чернов, 1989; Штейнберг и др., 1993; Campbell, Bozorgnia, 2014; Akkar et al., 2014; Boore, 2018; Заалишвили и др., 2022; Данилова и др., 2024; Силачева, Кудабаяева, 2025]. Такое положение дел связано с тем, что инженерно-сейсмологические исследования (а именно они составляют большую часть работ по оценкам параметров СДГ) в первую очередь направлены на удовлетворение нужд антисейсмического проектирования и строительства. Последние же, в основном пока ориентируются на учет дополнительных сейсмических нагрузок – т.е. на уровни возможных сейсмических ускорений. В то же время, еще в начале шестидесятых годов прошлого века выдающийся ученый С.В. Медведев в своих работах, (см., например, [Медведев, 1962]) высказывал предположения о том, что при определенных условиях разрушительные эффекты землетрясений в не меньшей, а возможно даже в большей степени могут быть связаны не с ускорениями (силами), а со скоростями (энергиями) колебаний грунта. Затем, на фоне постепенно возрастающего объема данных по инструментальной регистрации СДГ в различных сейсмоактивных районах мира, к сходным выводам, стали приходить и некоторые другие авторы. Так, например, в работе [Чернов, 1989] подчеркивалась роль скоростей колебаний грунта в формировании общего макросейсмического эффекта землетрясений средней и большой силы. Кроме того, в этой работе показано значительное влияние на макросейсмическую интенсивность сотрясений таких параметров, как периоды, длительности и форма колебаний грунта.

Еще один, важный на наш взгляд, результат исследований, описанных в [Чернов, 1989], состоит в обнаружении определенных связей между периодами и длительностями ускорений, скоростей и смещений колебаний грунта как между собой, так и с параметрами генерирующих их очагов землетрясений.

Несмотря на то что оба вышеуказанных результата из [Чернов, 1989] могут представлять определенный интерес как в познавательном, так и в практическом плане, к ним все же следует относиться с осторожностью из-за ограниченной на тот момент базы по инструментальным записям СДГ. Поэтому, приведенные в этой работе данные следует квалифицировать как сугубо предварительные, которые по мере нарастания статистики наблюдений могут быть значительно скорректированы и уточнены. К настоящему времени, вследствие развития в разных странах инструментальных сетей для регистрации движений грунта при сильных землетрясениях,

общий объем записей СДГ многократно возрос и появилась возможность вернуться к данной теме и провести на основе этой расширенной базы новое исследование, с более высоким уровнем надежности и реалистичности получаемых результатов. Вариант решения данной задачи и составляет основное содержание данной работы.

Информационная база и методика исследования

В работе используются приведенные в базах данных Strong-Motion Virtual Data Center (VDC) (<https://strongmotioncenter.org/vdc/scripts/earthquakes.plx>) и European Strong-Motion Database (ESD) (https://www.isesd.hi.is/ESD_Local/frameset.htm), а также в публикациях (The Northridge, California Earthquake of January 17. Central Reconnaissance Report. National Center For Earthquake Engineering Research. Edited by J.D. Goltz. Technical Report NCEER-94-0005, March 11, 1994) [San Fernando ..., 1973; Preliminary ..., 1979] инструментальные записи ускорений и пересчитанные по ним интегрированием и двойным интегрированием записи скоростей и смещений колебаний грунта при произошедших в разных районах мира землетрясениях различных магнитуд и удаленностей. Основной объем первичных записей – это записи калифорнийских землетрясений и некоторых других районов Запада США, среди которых землетрясения San Fernando (09.02.1971), Coyote Lake (06.08.1979), Imperial Valley (15.10.1979), Coalinga (06.08.1983), Morgan Hill (24.04.1984), North Palm Springs (07.08.1986), Whittier Narrows (01.10.1987), Loma Prieta (17.10.1989), Cape Mendocino (25.04.1992), Landers (28.06.1992), Northridge (17.01.1994), Hector Main (16.10.1999), Chino Hills (29.07.2008), La Habra (28.03.2014) и др. Используются также записи землетрясений Италии, Греции, Югославии (в настоящее время Черногории), Индии, некоторых землетрясений Новой Зеландии. Вышеуказанные записи СДГ характеризуют в основном землетрясения большой и средней интенсивности с магнитудами $M \approx 5-7$.

Использованы также полученные в Институте физики земли АН СССР (в настоящее время Институт физики Земли РАН), в Институте сейсмологии АН УзССР (в настоящее время Институт сейсмологии АН Узбекистана), и в Институте морской геологии и геофизики ДВО АН СССР (в настоящее время Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН) непосредственно записи смещений, а также скоростей и ускорений колебаний грунта при землетрясениях на Кавказе, в Средней Азии и на Дальнем Востоке. Эти записи преимущественно относятся к землетрясениям средней и низкой интенсивности с магнитудами $M \approx 3-5$. Подробную информацию об этих данных можно найти в [Рустанович, 1974; Дагестанское ..., 1981; Назарбекское ..., 1984; Газлийские ..., 1986; Адылов и др., 1988; Чернов, 1989; Геодинамика ..., 1997].

В анализируемую в настоящем исследовании выборку включались только записи мелкофокусных землетрясений с глубинами очагов менее 40 км. При этом не учитывались региональные особенности очаговых зон землетрясений и путей распространения сейсмических возмущений, механизмы подвижек в очагах и локальные грунтовые условия в пунктах регистрации. Фиксировались только магнитуды землетрясений и расстояния, на которых производилась запись.

На каждой анализируемой записи (акселерограмме, велосиграмме и сейсмограмме) визуально измерялись период колебания с максимальной амплитудой (T_a , T_v и T_d соответственно) и относительная длительность колебаний (t_a , t_v и t_d соответственно). Под периодом колебаний, в данном случае, понимается либо время

на записи между двумя соседними однонаправленными пересечениями условной нулевой линии, когда максимальный по амплитуде сейсмический сигнал имеет относительно выраженную «колебательную» форму, либо удвоенное время между соседними разнонаправленными пересечениями нулевой линии, когда такой сигнал имеет «импульсную» форму (см. [Чернов, 1989]). Под относительной длительностью здесь понимается время на записи, когда амплитуды в общем цуге колебаний составляют не менее 1/3 от максимальной.

В процессе дальнейшего анализа отобранные записи СДГ сгруппированы по магнитудам землетрясений (M) – $M=3(2,5-3,4)$, $M=4(3,5-4,4)$, $M=5(4,5-5,4)$, $M=6(5,5-6,4)$ и $M=7(6,5-7,4)$. Внутри этих групп формировались выборки отдельно для каждого из рассматриваемых параметров T_a , T_v , T_d и t_a , t_v , t_d . По этим выборкам методом подбора строились итоговые зависимости (аппроксимирующие выражения) $T_a(M,D)$, $T_v(M,D)$, $T_d(M,D)$ и $t_a(M,D)$, $t_v(M,D)$, $t_d(M,D)$, где D – расстояние до очага. В большинстве первоисточников по СДГ последних лет и относящихся к достаточно крупным событиям, расстояния, на которых производились записи, даются в терминах «расстояние до разрыва». В нашем исследовании принято, что D равно «расстоянию до разрыва». Для записей СДГ более раннего периода, а также для землетрясений небольших магнитуд удаленность в первоисточниках обычно дается в виде гипоцентрального (r), а иногда эпицентрального (Δ) расстояния, которые могут существенно отличаться от D . Для таких записей данные первоисточников по r и Δ путем введения соответствующих поправок пересчитаны в значения D . С процедурами таких пересчетов можно подробно ознакомиться, например, в [Чернов, 2024]. Здесь лишь отметим, что тестирование таких пересчетов показало их удовлетворительную пригодность для такого рода построений.

В таблице 1 приведены некоторые данные, дающие представление об общем объеме и структуре используемого статистического материала.

Таблица 1 / Table 1

Обобщенные характеристики исходных данных по инструментальной регистрации землетрясений, использованных для оценок периодов (T_a , T_v , T_d) и длительностей (t_a , t_v , t_d) колебаний грунта / Generalized characteristics of the initial data on instrumental earthquake registration used to estimate the periods (T_a , T_v , T_d) and durations (t_a , t_v , t_d) of ground motions

Параметры колебаний грунта / Ground vibration parameters	M	Тип записи / Record type					
		Акселерограммы / Accelerograms		Велосиграммы / Velosigrams		Сейсмограммы / Seismograms	
		D, км	N	D, км	N	D, км	N
T_a , T_v , T_d	7(6,5–7,4)	1–224	687	1–224	687	1–224	687
	6(5,5–6,4)	0,5–170	558	0,5–170	559	0,5–170	558
	5(4,5–5,4)	0,5–100	279	0,5–205	304	1–104	289
	4(3,5–4,4)	3–43	128	1–200	170	0,5–77	411
	3(2,5–3,4)	1–32	91	3–128	171	1–88	402
t_a , t_v , t_d	7(6,5–7,4)	1–224	687	1–224	687	1–224	687
	6(5,5–6,4)	0,5–170	555	0,5–225	564	0,5–170	558
	5(4,5–5,4)	0,5–104	279	1–196	293	1–104	289
	4(3,5–4,4)	3–43	128	1,5–204	167	0,5–77	411
	3(2,5–3,4)	1–30	88	2–168	165	1–88	402

Примечание: M – магнитуды землетрясений; D – расстояния до очага; N – количество записей, использованных для измерений. / Note M is the magnitude of the earthquakes; D is the distance to the source; N is the number of records used for measurements.

При производстве оценок принято, что все рассматриваемые параметры колебаний грунта (T_a , T_v , T_d и t_a , t_v , t_d) являются случайными величинами, имеющими при заданных M и D логнормальные распределения во всем рассматриваемом диапазоне их изменения.

Результаты и обсуждения

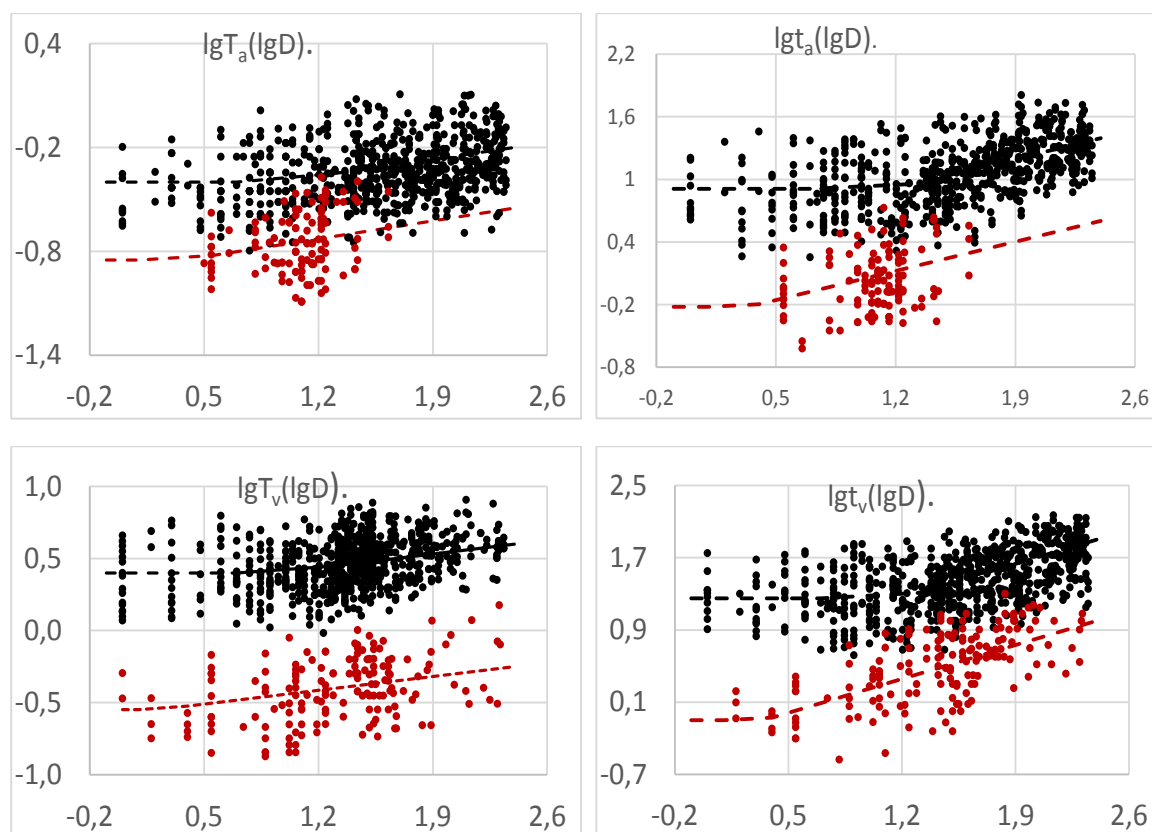
На рисунке 1 в графическом виде приведены примеры анализируемых выборок значений рассматриваемых параметров колебаний грунта при землетрясениях различных магнитуд и удаленностей и аппроксимирующих их зависимостей $T_a(M,D)$, $T_v(M,D)$, $T_d(M,D)$ и $t_a(M,D)$, $t_v(M,D)$, $t_d(M,D)$.

На всех графиках рисунка 1 по аналогии с рассмотренными нами ранее зависимостями от расстояния спектров колебаний грунта (см. [Чернов, 2024]) можно выделить ближние, промежуточные (переходные) и дальние зоны. Размеры этих зон описываются выражениями:

$$\lg D_0 = 0,200 M - 0,700, \quad (1)$$

$$\lg D_1 = 0,250 M - 0,450, \quad (2)$$

где D_0 – размеры ближних зон, т.е. расстояния (в км), на которых проходят границы между ближними и промежуточными (переходными) зонами; D_1 – размеры промежуточных (переходных) зон, т.е. расстояния (в км), на которых проходят границы между промежуточными (переходными) и дальними зонами.



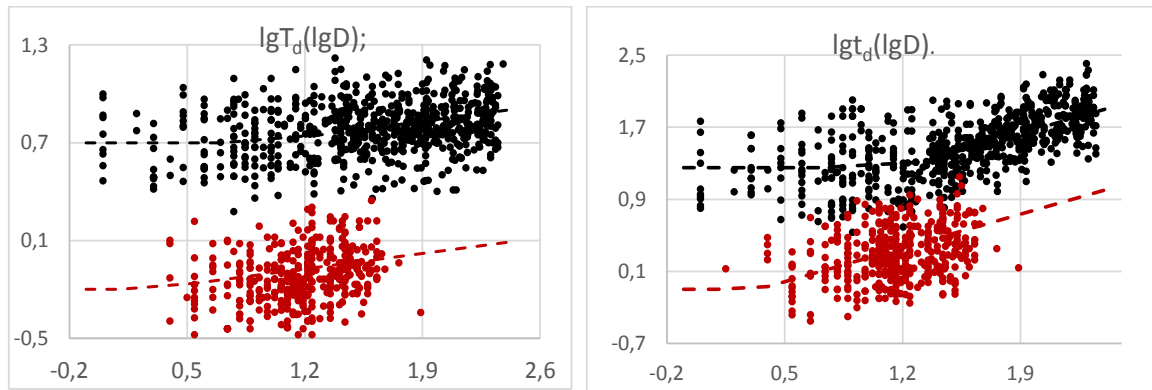


Рис. 1. Примеры анализируемых массивов логарифмов индивидуальных значений рассматриваемых параметров колебаний грунта (точки) и аппроксимирующих их зависимостей (пунктирные линии). Черный и красный цвета – оценки для землетрясений с магнитудами $M=7$ и $M=4$ соответственно. Оси ординат – значения $\lg T_a$, $\lg T_v$, $\lg T_d$ и $\lg t_a$, $\lg t_v$, $\lg t_d$, где T_a , T_v , T_d и t_a , t_v , t_d в с. Оси абсцисс – значения $\lg D$, где D в км /

Fig. 1. Examples of the analyzed arrays of logarithms of individual values of the considered parameters of ground motions (dots) and approximating their dependencies (dotted lines). The black and red colors are estimates for earthquakes with magnitudes $M=7$ and $M=4$, respectively. The ordinate axes are the values $\lg T_a$, $\lg T_v$, $\lg T_d$ and $\lg t_a$, $\lg t_v$, $\lg t_d$, where T_a , T_v , T_d and t_a , t_v , t_d in sec. The abscissa axes are the $\lg D$ values, where D is in km

Физический смысл ближних зон для периодов и длительностей такой же, как и для аналогичных зависимостей спектров колебаний – это зоны, в которых данные параметры достигают своих предельных значений и слабо зависят от расстояния до очага. В промежуточных же и дальних зонах для зависимостей периодов и длительностей, так же, как и в случае зависимостей спектров наблюдается изменение их уровней – соответственно сначала более медленное, а затем более быстрое. Отличие от вышеупомянутых зависимостей спектров состоит в том, что для спектров в ближних зонах предельные уровни – это максимальные значения, а для периодов и длительностей, наоборот, минимальные. В промежуточных и дальних зонах характер изменения спектров и периодов, и длительностей колебаний также противоположный. Так если уровень спектров по мере удаления от очагов снижается, то уровень периодов и длительностей, наоборот, повышается.

В аналитическом виде приведенные на рисунке 1 аппроксимирующие зависимости можно описать выражениями:

Для ускорений

$$\lg T_a = \begin{cases} 0,158M - 1,525 & \text{при } D \leq D_0 \\ 0,158M + 0,095 \lg(D/D_0) - 1,525 & \text{при } D_0 \leq D \leq D_1 \\ 0,158M + 0,095 \lg(D/D_0) + 0,137 \lg(D/D_1) - 1,525 & \text{при } D \geq D_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\lg t_a = \begin{cases} 0,369M - 1,682 & \text{при } D \leq D_0 \\ 0,369M + 0,090 \lg(D/D_0) - 1,682 & \text{при } D_0 \leq D \leq D_1 \\ 0,369M + 0,090 \lg(D/D_0) + 0,402 \lg(D/D_1) - 1,682 & \text{при } D \geq D_1 \end{cases} \quad (4)$$

Для скоростей

$$\lg T_v = \begin{cases} 0,324M - 1,864 & \text{при } D \leq D_0 \\ 0,324M + 0,083 \lg(D/D_0) - 1,864 & \text{при } D_0 \leq D \leq D_1 \\ 0,324M + 0,083 \lg(D/D_0) + 0,137 \lg(D/D_1) - 1,864 & \text{при } D \geq D_1 \end{cases} \quad (5)$$

$$\lg t_v = \begin{cases} 0,451M - 1,935 & \text{при } D \leq D_0 \\ 0,451M + 0,100 \lg(D/D_0) - 1,935 & \text{при } D_0 \leq D \leq D_1 \\ 0,451M + 0,100 \lg(D/D_0) + 0,537 \lg(D/D_1) - 1,935 & \text{при } D \geq D_1 \end{cases} \quad (6)$$

Для смещений

$$\lg T_a = \begin{cases} 0,315M - 1,508 & \text{при } D \leq D_0 \\ 0,315M + 0,083 \lg(D/D_0) - 1,508 & \text{при } D_0 \leq D \leq D_1 \\ 0,315M + 0,083 \lg(D/D_0) + 0,137 \lg(D/D_1) - 1,508 & \text{при } D \geq D_1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\lg t_a = \begin{cases} 0,460M - 1,979 & \text{при } D \leq D_0 \\ 0,460M + 0,110 \lg(D/D_0) - 1,979 & \text{при } D_0 \leq D \leq D_1 \\ 0,460M + 0,110 \lg(D/D_0) + 0,537 \lg(D/D_1) - 1,979 & \text{при } D \geq D_1 \end{cases} \quad (8)$$

В выражениях (1)–(8) T_a , T_v , T_d и t_a , t_v , t_d в с, D , D_0 , D_1 в км.

Выражения (1)–(8) справедливы для $M=3-7$ и $D < 250$ км.

Отдельный интерес в данном исследовании представляют оценки периодов и длительностей колебаний грунта в ближних зонах землетрясений разных магнитуд. Именно в этих зонах данные характеристики подвержены наименьшему влиянию среды распространения сейсмических волн и поэтому в ряде случаев лучше, чем удаленные оценки, подходят для изучения очагов землетрясений. Если рассматривать записи, зарегистрированные непосредственно в ближних зонах, то основным ограничением здесь является их относительно небольшая статистика. Это естественным образом отрицательно сказывается на качестве основанных на этих данных оценок и вытекающих из них построений и интерпретаций. Поэтому, в настоящей работе с целью хотя бы частичного восполнения дефицита таких данных, значения периодов и длительностей, измеренные на разных расстояниях D при помощи выражений (1)–(8) пересчитаны в ближние зоны рассматриваемых в настоящей работе землетрясений. По полученным таким образом новым, более многочисленным массивам данных произведены оценки периодов и длительностей колебаний в ближних зонах землетрясений разных магнитуд. В графическом виде типичные примеры вышеуказанных эмпирических распределений (гистограмм) и аппроксимирующих их теоретических распределений плотностей вероятности приведены на рисунке 2. Из этих примеров видно, что полученные эмпирические оценки не противоречат сделанному ранее предположению о логарифмически нормальном распределении значений периодов и длительностей колебаний всех исследуемых кинематических характеристик при всех рассматриваемых M и D . В численном виде оценки параметров этих распределений приведены в таблице 2.

По приведенным в таблице 2 оценкам для ближних зон землетрясений рассчитаны аппроксимирующие зависимости наиболее вероятных значений логарифмов периодов пиковых амплитуд и относительных длительностей ускорений, скоростей и смещений колебаний грунта от магнитуд землетрясений – $\lg T_a(M)$, $\lg T_v(M)$, $\lg T_d(M)$ и $\lg t_a(M)$, $\lg t_v(M)$, $\lg t_d(M)$. В аналитическом виде эти зависимости можно представить как:

Для ускорений

$$\lg T_a = 0,158M - 1,524 \quad (9)$$

$$\lg t_a = 0,370M - 1,683 \quad (10)$$

Для скоростей

$$\lg T_v = 0,324M - 1864 \quad (11)$$

$$\lg t_v = 0,451M - 1,935 \quad (12)$$

Для смещений

$$\lg T_d = 0,315M - 1,508 \quad (13)$$

$$\lg t_d = 0,460M - 1,979 \quad (14)$$

В выражениях (9)–(14) T_a , T_v , T_d и t_a , t_v , t_d в с.

Выражения (9)–(14) справедливы для $M=3-7$.

Стандартные отклонения логарифмов каждого из параметров внутри рассмотренного диапазона магнитуд землетрясений колеблются с относительно небольшим разбросом и в среднем для ближних зон землетрясений в диапазоне $M=3-7$ составляют: 0,166 для $\lg T_a$ и 0,249 для $\lg t_a$; 0,173 для $\lg T_v$ и 0,287 для $\lg t_v$; 0,159 для $\lg T_d$ и 0,267 для $\lg t_d$.

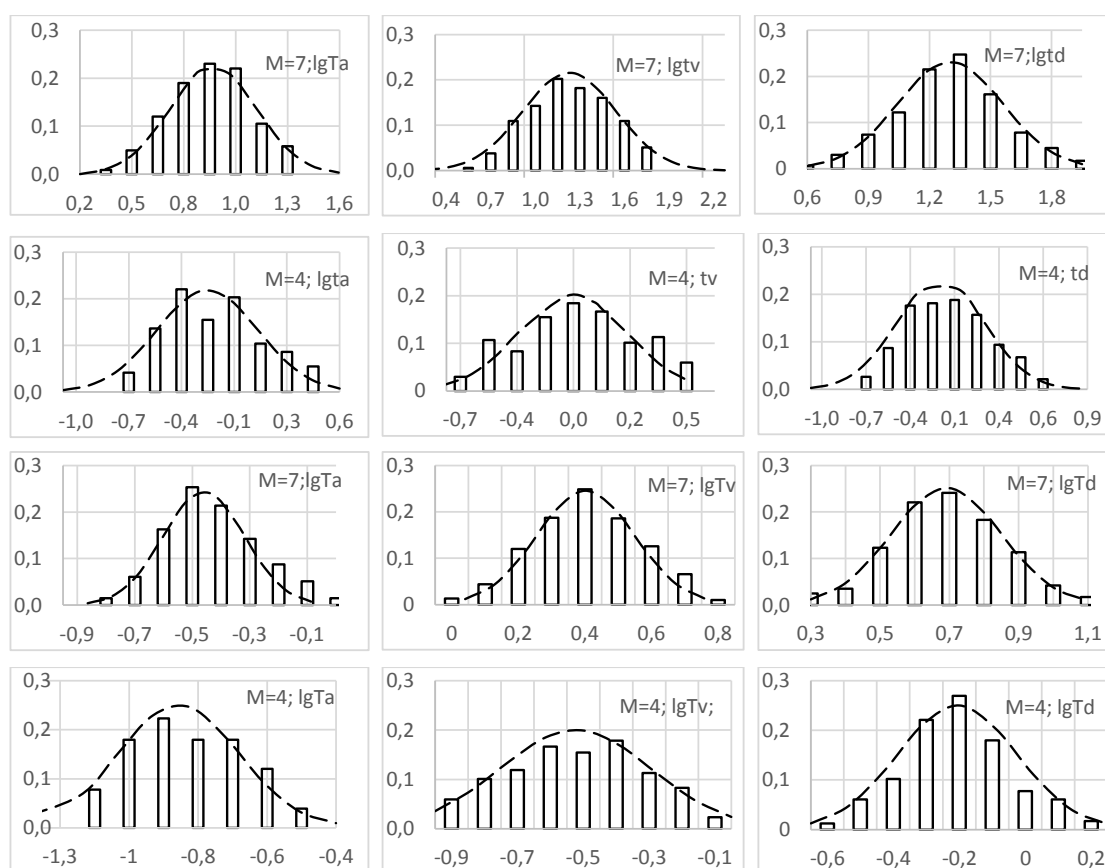


Рис. 2. Примеры гистограмм логарифмов периодов и длительностей колебаний грунта рассчитанных для ближних зон землетрясений разных магнитуд (сплошные линии) и аппроксимирующих их кривых плотностей вероятности (пунктирные линии) в предположении логнормального распределения этих величин. Оси абсцисс – значения $\lg T_a$, $\lg T_v$, $\lg T_d$ и $\lg t_a$, $\lg t_v$, $\lg t_d$ в с. Оси ординат – относительные частоты случаев (измерений) и расчетные значения плотностей вероятности /

Fig. 2. Examples of histograms of logarithms of periods and durations of ground motions calculated for the near zones of earthquakes of different magnitudes (solid lines) and approximating probability density curves (dotted lines) assuming a log. normal distribution of these quantities. The abscissa axes are the values of $\lg T_a$, $\lg T_v$, $\lg T_d$ and $\lg t_a$, $\lg t_v$, $\lg t_d$ in sec. The ordinate axes are the relative frequencies of cases (measurements) and calculated values of probability densities

Таблица 2 / Table 2

Объемы выборок и оценки средних (наиболее вероятных) значений и стандартов логарифмов периодов (T_a , T_v , T_d) и длительностей (t_a , t_v , t_d) колебаний грунта в предположении их нормального распределения вероятностей в ближних зонах землетрясений разных магнитуд (M). T_a , T_v , T_d и t_a , t_v , t_d в с /

Sample sizes and estimates of the average (most probable) values and standards of logarithms of periods (T_a , T_v , T_d) and durations (t_a , t_v , t_d) of ground motions, assuming their normal probability distribution in the near zones of earthquakes of different magnitudes (M). T_a , T_v , T_d and t_a , t_v , t_d in sec

Кинематическая характеристика колебаний/ Kinematic characteristics of vibrations	M	Параметры колебаний грунта Ground vibration parameters					
		lg T_a , lg T_v , lg T_d			lgt $_a$, lgt $_v$, lgt $_d$		
		Объем выборки/ Sample size	Среднее значение/ The average value	Стандарт/ Standard	Объем выборки/ Sample size	Среднее значение/ The average value	Стандарт/ Standard
Ускорения/ Accelerations	7(6,5-7,4)	687	-0,423	0,163	687	0,900	0,242
	6(5,5-6,4)	558	-0,578	0,168	558	0,513	0,254
	5(4,5-5,4)	279	-0,745	0,197	279	0,206	0,267
	4(3,5-4,4)	128	-0,857	0,165	128	-0,220	0,273
	3(2,5-3,4)	91	-1,072	0,138	88	-0,580	0,208
Скорости/ Speeds	7(6,5-7,4)	687	0,402	0,163	687	1,207	0,265
	6(5,5-6,4)	558	0,087	0,177	564	0,778	0,253
	5(4,5-5,4)	304	-0,258	0,162	293	0,326	0,269
	4(3,5-4,4)	170	-0,579	0,205	167	-0,105	0,304
	3(2,5-3,4)	171	-0,883	0,159	165	-0,606	0,344
Смещения/ Offsets	7(6,5-7,4)	687	0,690	0,159	687	1,251	0,259
	6(5,5-6,4)	558	0,385	0,176	558	0,780	0,245
	5(4,5-5,4)	289	0,068	0,154	289	0,309	0,257
	4(3,5-4,4)	411	-0,256	0,160	411	-0,147	0,284
	3(2,5-3,4)	402	-0,562	0,146	402	-0,586	0,268

Данные таблицы 2 и выражения (9)–(14) показывают, что рассчитанные для ближних зон землетрясений величины T_v и T_d возрастают при увеличении M с примерно одинаковой скоростью. При этом периоды максимальных скоростей колебаний грунта остаются ~ в 2 раза меньшими, чем периоды максимальных смещений. Величины t_v и t_d в этих зонах имеют близкие значения в рассматриваемом диапазоне магнитуд землетрясений. Относительные длительности интенсивных ускорений близки к аналогичным характеристикам скоростей и смещений только при небольших магнитудах землетрясений. При увеличении M они тоже возрастают, но со значительно меньшей скоростью, чем аналогичные характеристики скоростей и смещений. Изменение (возрастание) величин T_a при росте M также существенно более медленное, чем T_v и T_d . Соотношения между T_a с одной стороны, и T_v и T_d с другой, не постоянны и изменяются (уменьшаются) при увеличении M . Так, если при $M \approx 3$ периоды T_a примерно в 2 раза меньше T_v и в 4 раза меньше T_d , то при землетрясениях с $M \approx 5$, эти соотношения составляют уже порядка 1/3 и 1/6, а при $M \approx 7$, еще меньше – около 1/6 и 1/12 соответственно.

Приведенные сопоставления могут интерпретироваться в русле представлений о сложнопостроенном очаге землетрясения, в формирование которых большой вклад внесли выдающиеся отечественные ученые (см., например, [Костров, 1975; Садов-

ский и др., 1983; Шебалин, 1986; Штейнберг и др., 1993]). Согласно этим представлениям, очаги крупных землетрясений (причем, чем крупнее, тем более сложные) являются совокупностями отдельных разнонаправленных разрывов, которые, в свою очередь, могут иметь разные скорости распространения, разные формы и размеры, разные направления и величины подвижек. Времена работы этих разрывов хотя в целом и контролируются временем действия всего очага, но внутри этого интервала могут располагаться со значительной долей случайности. Один из основных выводов, вытекающий из сказанного, состоит в том, что относительно простые и хорошо разработанные в математическом плане (например, дислокационные) модели (см., обзор [Николаевский, 1982]) достаточно эффективно могут использоваться для оценок параметров СДГ преимущественно при небольших землетрясениях или применительно к отдельным фрагментам очагов более крупных событий.

Изложенное выше, в сочетании с полученными в настоящем исследовании оценками периодов и длительностей колебаний грунта в ближних зонах землетрясений с разными M позволяет в качестве гипотезы предположить, что максимальные скорости и смещения в ближней зоне среднестатистически связаны с одними и теми же движениями грунта и, соответственно, с одними и теми же движениями в самом очаге, т.е. с работой одних и тех же источников. Фаза максимальных ускорений в области малых магнитуд, по-видимому, в среднем определяется теми же движениями, что и, максимальные скорости и смещения. При росте магнитуд землетрясений, т.е. при возрастании общих размеров и усложнении строения очагов, ускорения во все большей степени становятся связанными с более короткопериодными движениями, осложняющими основную фазу скоростей и смещений. Далее, исходя из предположения что, в среднем, за полпериода смещений происходит полный период колебаний скорости и два периода колебаний ускорений на рисунке 3 сопоставлены рассчитанные по выражениям (9)–(14) величины t_v , t_d , $T_d/2$ и T_v , а также $2T_a$. Из этого рисунка видно, что при небольших магнитудах землетрясений ($M \leq 3,5$) значения $T_d/2$, T_v и $2T_a$, а также t_v и t_d в пределах точности построений (в среднестатистическом смысле, разумеется) практически одинаковы. По мере роста M значения $T_d/2$, T_v и особенно $2T_a$ все больше отстают от t_v и t_d и начиная с $M \geq 4,5$ становятся более чем в 2 раза меньше последних. При еще больших магнитудах начинает сказываться разница в скорости возрастания $T_d/2$ или T_v с одной стороны и $2T_a$, с другой. Так, уже при $M \approx 5,0$ величины $2T_a$ статистически значимо ($\sim$ в 2 раза) отличаются от $T_d/2$ или T_v . При $M \approx 7,0$ величины $2T_a$ в еще большей степени (в 5–6 раз) меньше, чем $T_d/2$ или T_v , которые, в свою очередь, в 5–6 раз меньше t_v или t_d . Продолжая рассмотрение вышеописанного эмпирического материала и ориентируясь на представления о когерентных и некогерентных излучателях (очаговых источниках сейсмических возмущений), изложенные в известных теоретических и экспериментальных разработках [Костров, 1975; Brune, 1976; Шамина, 1981; Аки, Ричардс, 1983; Штейнберг и др., 1993] можно предположить также, что рассматриваемые параметры колебаний характеризуют время работы неких очаговых источников или излучателей, например, время вспарывания разрывов или отдельных частей этих разрывов. Тогда, принимая, в соответствии с распространенными сейчас оценками, средние скорости вспарывания разрывов в очагах коровых землетрясений равными $V_r \approx 3$ км/с, можно в усредненной форме оценить соотношения размеров соответствующих источников или излучателей (см. рис. 3). Из этого рисунка видно, что размеры излучателей, «ответственных» за t_v или t_d практически совпадают с раз-

мерами очагов землетрясений соответствующих магнитуд, оцениваемыми по данным ряда исследователей (см., например, [Садовский и др., 1983; Штейнберг и др., 1993; Wells, Coppersmith, 1994; Leonard, 2010]). Излучатели, «ответственные» за T_v и $T_d/2$, по размерам совпадают с очагами землетрясений только при небольших M , а в общем случае (при росте величины M) составляют лишь часть очага. И, наконец, излучатели, «ответственные» за параметр $2T_a$, свою очередь составляют часть излучателей, «ответственных» за T_v и $T_d/2$ и, поэтому, они при росте M , становятся еще меньшей частью всего очага землетрясения.

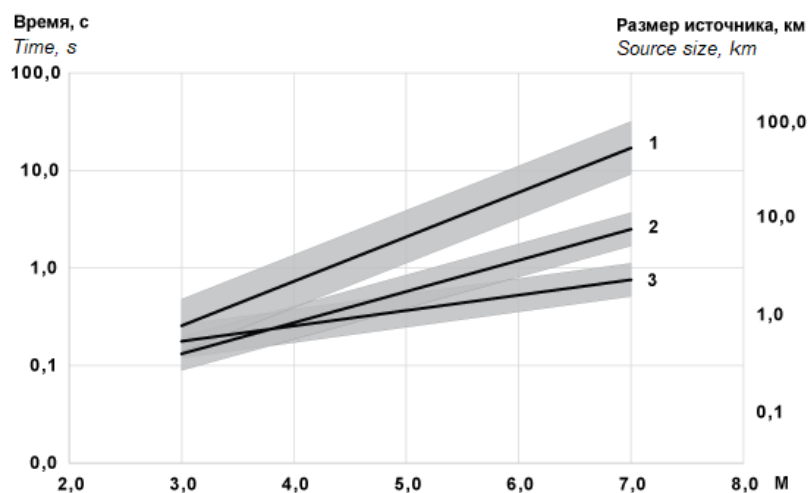


Рис. 3. Оценки t_v и t_d (1); $T_d/2$ и T_v (2); $2T_a$ (3), полученные для ближних зон землетрясений разных магнитуд (M), где черные линии – их наиболее вероятные значения, серый цвет – области 70% уровня доверия и предполагаемые размеры соответствующих источников или эффективных излучателей (правая ось ординат) /

Fig. 3. Estimates of t_v and t_d (1); $T_d/2$ and T_v (2); $2T_a$ (3) obtained for the near zones of earthquakes of different magnitudes (M), where the black lines are their most likely values, the gray color is the area of 70% confidence level and the estimated size of the corresponding sources or effective oscillators (right ordinate axis)

Таким образом, исходя из представлений о сложнопостроенном источнике сейсмических волн, в нем можно (в качестве гипотезы) выделить три вида эффективных излучателей, которые определяют различные характеристики колебаний грунта в ближней зоне землетрясений. Первый вид, который далее будем также называть «источники» – это очаги в целом, с размерами (L), возрастающими примерно в три раза при увеличении M на единицу. При $M \leq 3$ эти излучатели определяют все рассматриваемые в данном исследовании параметры колебаний, а также пиковые амплитуды ускорений, скоростей и смещений грунта, а при $M > 3-4$ – только t_v и t_d . Вторым видом, который далее будем называть также «субисточники первого типа» – осложняющие основной разрыв (или «источник») локальные неоднородности, опережающие разломы и т.п., которые заметно проявляются при размерах очагов $L > 2-3$ км. Размеры этих излучателей (L') тоже возрастают с магнитудой, но медленнее, чем $L(M)$, составляя от $L' \approx L/2$ при $M \approx 3-4$ до $L' \approx L/5$ при $M \approx 7,0$. При $M < 5$ эти излучатели определяют параметры T_a , T_v , T_d и t_a , а также пиковые амплитуды ускорений, скоростей и смещений, а при возрастании магнитуд ($M > 5$) – только T_v , T_d и t_a . Третий вид – «субисточники второго типа», которые начинают осложнять субисточники первого типа, когда те, в свою очередь, достигают размеров $L' \approx 2-3$ км и более. Их размеры (L'') также растут с увеличением M , но еще медленнее, чем L' , и со-

ставляют от $L \approx L'/2$ при $M \approx 5$ до $L \approx L'/5$ при $M \approx 7,0$. Эти излучатели определяют максимальные амплитуды и T_a ускорений.

Из изложенной гипотезы вытекает некоторый дуализм в ответе на вопрос о существовании подобия очагов землетрясений разной величины, а именно, что очаги землетрясений имеют элементы подобия, но в целом же просто подобными не являются из-за того, что небольшие и более крупные очаги возникают и развиваются в различных по масштабам и степени однородности (и по реологическим свойствам также) геологических средах. Так, очаги небольших землетрясений (например, с $M \approx 3$) способные «уместиться» в ограниченных по размеру и относительно однородных элементах сеймотектонических структур можно сравнить с простыми дислокациями, генерирующими когерентные сейсмические сигналы «импульсного» типа. Это же относится и к субисточникам первого и второго типа, пока их размеры не превышают нескольких сотен метров. По мере роста размеров как источников, так и субисточников, из-за увеличения относительной неоднородности вмещающей эти источники среды, их структура все больше усложняется и в генерируемых ими сейсмических сигналах растет доля некогерентной составляющей. Причем это относится не только к ускорениям, но при определенных соотношениях размеров источников и частот генерируемых колебаний, также и к скоростям и смещениям, вследствие чего регистрируемые записи СДГ приобретают более сложную «колебательную» форму (см. также [Костров, 1975; Чернов, 1989]). В этом сходстве механизмов возникновения и развития, как источников, так и субисточников, согласно данной гипотезе и заключается подобие рассматриваемых очагов землетрясений разных магнитуд.

Из изложенного также можно видеть, что хотя размеры вышеописанных источников (очагов землетрясений) и их составных частей (субисточников) и меняются, тем не менее, в среднем, они находятся в определенных количественных соотношениях. Как было отмечено нами еще в работе [Чернов, 1989], эти соотношения могут быть близки к иерархическим соотношениям структур М.А. Садовского [Садовский, 1984]. Однако, как подчеркивалось выше, из-за имевшейся в то время ограниченности проанализированного материала данное предположение тогда являлось предварительным и нуждающимся в проверке. Настоящее исследование, выполненное с использованием значительно более полных данных, подтверждает сделанное нами ранее предположение о том, что строение очагов землетрясений в определенном смысле подчиняется общим закономерностям дробления, или дискретности или «кусковатости» твердой материи «от пылинок до планет» (см. [Садовский, 1984]).

Рассматривая далее эту гипотезу логично предположить, что если описанные в ней источники и субисточники сейсмических колебаний существуют и что соотношения между ними подчиняются общим законам иерархии структур по М.А. Садовскому, то тогда на высокочастотных склонах очаговых спектров могут отображаться не одна (f_0), как у Дж. Бруна ([Brune, 1976]), а уже две или три (а возможно и более) «угловых» или «корнер» частоты (f_1 , f_2 , f_3), отличающиеся друг от друга в 3–5 раз. Значения же этих частот должны контролироваться размерами источников и субисточников. На рисунке 4 показан вариант гипотетического очагового спектра Фурье колебательных смещений при землетрясении с $M=7$, построенного с учетом этих двух предположений, а также оценок длиннопериодных спектральных ускорений и смещений из [Campbell, Bozorgnia, 2014; Faccioli et al., 2004] и соответствующих дислокационным моделям очага Бруна-Аки и Хаскелла

(см. [Haskell, 1969; Brune, 1976; Аки, Ричардс, 1983]) скоростей спадания уровней спектральной плотности Фурье колебаний грунта ($|S|(f)$) при $f > f_0$. Пересчет спектров реакции в спектры Фурье выполнен по методике из [Чернов, 2024]. На этом же рисунке же для сравнения приведена эмпирическая модель спектра (являющаяся осреднением пересчетов спектров ускорений «мягких» и «твердых» грунтов) в ближней зоне землетрясения с $M=7$ из [Чернов, 2024] в соответствующий спектр смещений. Демонстрируемая рисунком 4 близость вышеуказанных двух спектров может свидетельствовать о правдоподобности описываемых выше гипотетических построений, а, заодно, и полученных нами ранее аналогичных, но полученных другим способом эмпирических моделей спектров колебаний грунта.

Еще одно подтверждение высказанным соображениям можно найти в недавней работе [Гусев и др., 2017], в которой показано, что именно такие множественные «угловые» или «корнер» частоты присутствуют на спектрах камчатских землетрясений.

В пользу данной гипотезы также могут говорить и полученные в Институте физики Земли РАН оценки наиболее близких расстояний, на которых обычно возникают очаги землетрясений одинаковых магнитуд. Так этими исследованиями, в частности, показано, что расстояния между ближайшими эпицентрами пар таких очагов хотя и являются случайными величинами, тем не менее, имеют выраженные центры распределений, которые изменяются, не хаотично, а примерно в 4 раза при изменении магнитуды землетрясения на единицу. Сами же эти расстояния контролируются размерами очагов землетрясений соответствующих магнитуд.

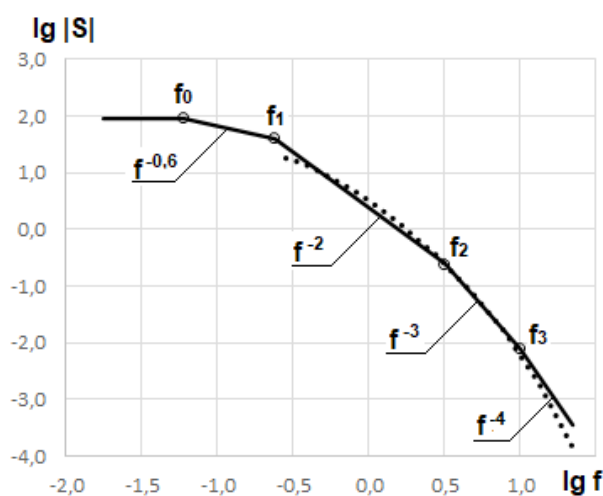


Рис. 4. Сравнение рассчитанных для ближней зоны землетрясения с $M=7$ гипотетического спектра колебаний (смещений) грунта настоящего исследования (сплошная линия) и эмпирического спектра, рассчитанного по данным из [Чернов, 2024] (точечная линия). Пустые кружки на гипотетическом спектре и индексы около них – «угловые» частоты, соответствующие источнику (f_0) и субисточникам первого, второго типа и возможного третьего типа (f_1, f_2 и f_3). Значки $f^{0.6} - f^4$ – спадание $|S|(f)$ в соответствующих сегментах гипотетического спектра. $|S|$ в $\text{см} \cdot \text{с}$; f в Гц

Fig. 4. Comparison of the hypothetical spectrum of vibrations of ground displacements calculated for the near earthquake zone with $M=7$ in this study (solid line) and the empirical spectrum calculated from the data from [Chernov, 2024] (dotted line). The empty circles on the hypothetical spectrum and the indexes next to them are the “angular” frequencies corresponding to the source (f_0) and sub-sources of the first, second type, and possible third type (f_1, f_2 , and f_3). The icons $f^{0.6} - f^4$ represent the decline of $|S|(f)$ in the corresponding segments of the hypothetical spectrum.

Выводы

1. Над очагами землетрясений наблюдаются участки поверхности, где функции $T_a(M,D)$, $T_v(M,D)$, $T_d(M,D)$ и $t_a(M,D)$, $t_v(M,D)$, $t_d(M,D)$ при заданных M имеют минимальные значения – ближние зоны. В ближних зонах периоды и длительности колебаний грунта не зависят от D и возрастают при увеличении M – быстрее для скоростей и смещений и медленнее для ускорений. За пределами ближних зон значения T_a , T_v , T_d и t_a , t_v , t_d возрастают по мере удаления от очага – сначала медленнее (промежуточные зоны), а затем быстрее (дальние зоны). В промежуточных зонах скорости возрастания с расстоянием параметров T_a , T_v , T_d и t_a , t_v , t_d отличаются незначительно. В дальних зонах длительности возрастают с расстоянием быстрее, чем периоды, а параметры скоростей и смещений быстрее, чем ускорений. Размеры ближних и промежуточных зон увеличиваются по мере роста M .

2. Полученные оценки периодов и длительностей интенсивных ускорений, скоростей и смещений колебаний грунта в ближних зонах землетрясений допускают их трактовку как характеристик времени работы различных (в общем случае) эффективных излучателей – источников сейсмических колебаний (меньших для ускорений и больших для смещений и скоростей) и в совокупности составляющих очаг землетрясения. Количественные соотношения, в которых находятся времена работы этих источников, а следовательно, и их размеры, подчиняются иерархии структур М.А. Садовского.

Литература

1. Адылов С.К., Соколов В.Ю., Фремд В.М. и др. Сильные землетрясения Узбекистана в 1984-1985 гг. – М.: ИФЗ АН СССР, 1988. – 121 с.
2. Аки Р., Ричардс П. Количественная сейсмология. Т. 2. – М.: Мир, 1983. – С. 751–857.
3. Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. – Ташкент: Фан, 1986. – 368 с.
4. Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. / Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. Т. VI. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – 237 с.
5. Гусев А.А., Скоркина А.А., Чебров Д.В. Очаговые спектральные параметры землетрясений Восточной Камчатки диапазона $M_w=3-6$ по данным поперечных волн. // Вестник КРАНЦУ. Науки о Земле. – 2017. – № 3. – Вып. 35. – С. 36–49.
6. Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. Разрушительные последствия. Инженерная сейсмология. Вопросы сейсмостойкого строительства. – М.: Наука, 1981. – 265 с.
7. Данилова Т.И., Перетокин С.А., Акатова К.Н., Медведева Прогноз сейсмической опасности: об эффективности карт общего сейсмического районирования ОСР-2016: коллективная монография. Труды IX Международной конференции «Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии». – Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН, 2024. – С. 226–234.
8. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Никонова Н.В., Смирнова, А.М. Уздин Характеристики пространственной неоднородности поля ускорений дневной поверхности. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 1. – С. 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006.
9. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 174 с.
10. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. – М.: Госстройиздат, 1962. – 284 с.
11. Назарбекское землетрясение 11 декабря 1980 г. – Ташкент: Фан, 1984. – 145 с.
12. Николаевский В.Н. Обзор: земная кора, дилатансия и землетрясения. / Дж. Райс Механика очага землетрясения. Успехи науки и техники. – М.: Мир, – 1982. – С. 133–215.
13. Рустанович Д.Н. Колебания поверхности земли в эпицентральных зонах сильных землетрясений. М.: Наука, 1974. – 97 с.

14. Садовский М.А. Иерархия структур: от пылинок до планет. // Земля и Вселенная. – 1984. – № 6. – С. 4–9.
15. Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Штейнберг В.В. О зависимости энергии землетрясений от объема сейсмического очага. // Доклады академии наук СССР. – 1983. – Т. 271. № 3. – С. 593–602.
16. Силачева Н.В., А.Д. Кудабаева А.Д. Оценка сейсмической опасности территорий Казахстана на примере Жамбылской области. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 1. – С. 92–104. DOI: 10.46698/VNC.2025.68.32.008.
17. Чернов Ю.К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территории. Ташкент: Фан, 1989. – 295 с.
18. Чернов Ю.К. Эмпирические модели для вероятностных оценок колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 90–106.
19. Шамина О.Г. Модельные исследования физики очага землетрясения. – М.: Наука, 1981. – 191 с.
20. Шебакин Н.В. Особенности тройного очага Газлийских землетрясений 1976–1984 гг. В сборнике: Газлийские землетрясения 1976–1984 гг. – Ташкент: Фан, – 1986. – С. 105–109.
21. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Аптикаев Ф.Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1993. – Вып. 34. – С. 5–94.
22. Akkar S., Sandikkaya M.A., Bommer J.J. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2014. – Vol. 12. No. 1. – pp. 359–387. DOI: 10.1007/s10518-013-9461-4.
23. Boore D.M. Ground-motion models for very-hard-rock sites in eastern North America: An update. // Seismological Research Letters. – 2018. – Vol. 89. Issue. 3. – pp. 1172–1184.
24. Brune J. The physics of earthquake strong motion. // Seismic Risk and Engineering Decisions. Amsterdam, 1976. – pp. 141–177.
25. Campbell K.W., Bozorgnia Y. NGA-West2 ground motion model for average horizontal components of PGA, PGV and 5% damped linear acceleration response spectra. // Earthquake Spectra. – 2014. – Vol. 30. No. 3. – pp. 1087–1115.
26. Faccioli E., Paolucci R., Rey J. Displacement spectra of long periods. // Earthquake Spectra. – 2004. – Vol. 20. No. 2. – pp. 347–376.
27. Haskell N. Elasting displacement in the near field of propagating fault. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1969. – Vol. 59. No. 3. – pp. 865–908.
28. Leonard M. Earthquake fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2010. – Vol. 100(5A). – pp. 1971–1988. DOI: 10.1785/0120090189.
29. Preliminary analysis of strong motion records from April 15, 1979. Montenegro, Yugoslavia earthquake, Skopje. – 1979. – No. 64. – 78 p.; No. 67. – 184 p.
30. San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971. Vol. III. U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington, D.C. 1973, – 482 p.
31. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1994. – Vol. 84. No. 4. – pp. 974–1002.

References

1. Adylov S.K., Sokolov V.Yu., Fremd V.M., Chernov Yu.K. Strong earthquakes in Uzbekistan in 1984–1985. Moscow. Institute of Physics of the Earth AS USSR. 1988. 121 p. (In Russ.)
2. Aki K., Richards P. Quantitative seismology. Vol. 2. Moscow. Mir. 1983. pp. 751–857. (In Russ.)

3. The Gazli earthquakes of 1976 and 1984. Tashkent. Fan. 1986. 368 p. (In Russ.)
4. Geodynamics of the tectonosphere of the junction zone of the Pacific Ocean with Eurasia. Problems of seismic hazard in the Far Eastern region. Vol. VI. Yuzhno-Sakhalinsk. IMGG FEB RAS. 1997. 237 p. (In Russ.)
5. Gusev A.A., Skorkina A.A., Chebrov D.V. Parameters of source spectra of $M_w = 3-6$ Eastern Kamchatka earthquakes based on shear wave data. Bulletin of KRAESC. Earth Sciences. 2017. Vol. 3. Issue 35. pp. 36–49. (In Russ.)
6. Dagestan earthquake on 14 May 1970. Destructive effects. Engineering seismology. Issues of earthquake engineering. Moscow. Nauka. 1981. 265 p. (In Russ.)
7. Danilova T.I., Peretokin S.A., Akatova K.N., Medvedeva Forecast of seismic hazard: on the effectiveness of maps of general seismic zoning 2016: a collective monograph. In: Dangerous natural and anthropogenic geological processes in the mountainous and foothill territories of the North Caucasus. Vladikavkaz. GPI VSC RAS. 2024. pp. 226–234.
8. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Nikonova N.V., Smirnova L.N., Uzdin A.M. Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field on the day surface. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006. (In Russ.)
9. Kostrov B.V. Mechanics of the tectonic earthquake source. Moscow. Nauka. 1975. 174 p. (In Russ.)
10. Medvedev S.V. Engineering seismology. Moscow. Gosstroyizdat. 1962. 284 p. (In Russ.)
11. The Nazarbek earthquake on 11 Decembe 1980. Tashkent. Fan. 1984. 145 p. (In Russ.)
12. Nikolaevsky V.N. Review: the Earth's crust, dilatation and earthquakes. J. Rice Mechanics of the earthquake source. Successes of Science and technology. Moscow. Mir. 1982. pp. 133–215. (In Russ.)
13. Rustanovich D.N. Vibrations of the Earth's surface in epicentral zones of strong earthquakes. Moscow. Nauka. 1974. 97 p. (In Russ.)
14. Sadovsky M.A. Hierarchy of structures: from dust particles to planets. Earth and the Universe. 1984. No. 6. C. 4–9. (In Russ.)
15. Sadovsky M.A., Pisarenko V.F., Steinberg V.V. On the dependence of earthquake energy on the volume of a seismic source. Doklaady Earth Sciences USSR. 1983. Vol. 271. No. 3. pp. 593–602. (In Russ.)
16. Silacheva N.V., Kudabayeva A.D. Seismic hazard assessment of Kazakhstan territory on the example of Zhambyl region. Geology and Geophysics of Russian South. 2025. Vol. 15. No. 1. pp. 92–104. DOI: 10.46698/VNC.2025.68.32.008. (In Russ.)
17. Chernov Yu.K. Strong ground motions and quantitative assessment of the seismic hazard of the territory. Tashkent. Fan. 1989. 295 p. (In Russ.)
18. Chernov Yu.K. Empirical models for probabilistic estimates of vibrations of “soft” and “hard” soils during earthquakes. Geology and geophysics of Russian South. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 90–106. (In Russ.)
19. Shamina O.G. Model studies of earthquake source physics. Moscow. Nauka. 1981. 191 p. (In Russ.)
20. Shebalin N.V. Features of the triple focus of the Gazli earthquakes 1976-1984. In: The Gazli earthquakes of 1976 and 1984. Tashkent. Fan. 1986. pp. 105–109 (In Russ.)
21. Shteinberg V.V., Saks M.V., Aptikaev F.F. et al. Methods of seismic impact assessment (manual). Problems of Engineering Seismology. 1993. Issue 34. pp. 5–94. (In Russ.)
22. Akkar S., Sandikkaya M.A., Bommer J.J. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. Bulletin of Earthquake Engineering. 2014. Vol. 12. No. 1. pp. 359–387. DOI: 10.1007/s10518-013-9461-4.
23. Boore D.M. Ground-motion models for very-hard-rock sites in eastern North America: An update. Seismological Research Letters. 2018. Vol. 89. Issue. 3. pp. 1172–1184.
24. Brune J. The physics of earthquake strong motion. Seismic Risk and Engineering Decisions. Amsterdam. 1976. pp. 141–177.

25. Campbell K.W., Bozorgnia Y. NGA-West2 ground motion model for average horizontal components of PGA, PGV and 5% damped linear acceleration response spectra. *Earthquake Spectra*. 2014. Vol. 30. No. 3. pp. 1087–1115.
26. Faccioli E., Paolucci R., Rey J. Displacement spectra of long periods. *Earthquake Spectra*. 2004. Vol. 20. No. 2. pp. 347–376.
27. Haskell N. Elastling displacement in the near field of propagating fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1969. Vol. 59. No. 3. pp. 865–908.
28. Leonard M. Earthquake fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2010. Vol. 100(5A). pp. 1971–1988. DOI: 10.1785/0120090189.
29. Preliminary analysis of strong motion records from April 15, 1979. Montenegro, Yugoslavia earthquake. Skopje. 1979. No. 64. 78 p.; No. 67. 184 p.
30. San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971. Vol. III. U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington, D.C. 1973. 482 p.
31. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994. Vol. 84. No. 4. pp. 974–1002.

DOI: 10.46698/VNC.2025.25.83.001

Original paper

Simulated of earthquake wave compatible with design spectrum

J.K. Karapetyan^{}, L.Kh. Hovhannisyan^{}, R.K. Karapetyan^{}

Institute of Geophysics and Engineering Seismology after A. Nazarov,
National Academy of Sciences of Republic Armenia,
5 V. Sargsyan Str., Gyumri 3115, Republic of Armenia,
e-mail: jon_iges@mail.ru

Received: 08.08.2025, revised: 15.09.2025, accepted: 19.09.2025

Abstract: Relevance. Artificial accelerograms are essential for seismic design, particularly in regions with limited strong motion data. In Armenia, the scarcity of such records hinders accurate seismic hazard assessments and structural design. **Aim.** This study aims to develop a new methodology for generating artificial accelerograms based on spectral normative curves, addressing the lack of strong earthquake data in the Republic of Armenia. **Methods.** The approach incorporates the only strong-motion record from the 07.12.1988 Spitak earthquake, supplemented with weaker local earthquake data ($M_w \geq 3.5$). By accumulating and processing these records, synthetic accelerograms are constructed to reflect realistic amplitude and frequency characteristics for various soil conditions. A dedicated software tool was developed to generate accelerograms consistent with spectral curves. **Results.** The proposed methodology enables the extrapolation of strong-motion accelerograms across different Armenian regions, contributing to the development of seismic hazard maps, including ground acceleration distributions and response spectra. The approach improves the accuracy of predicted ground motions compared to traditional dynamic curves lacking empirical support. The generated accelerograms can be applied in structural analysis, hazard assessment, and refinement of seismic design regulations. While developed for the Armenian Seismic Code, the methodology can be adapted to other international standards, broadening its relevance in global earthquake engineering.

Keywords: artificial accelerograms, seismic hazard assessment, response spectra, soil amplification, Spitak earthquake, seismic design regulations, spectrum-compatible ground motions.

For citation: Karapetyan J.K., Hovhannisyan L.Kh., Karapetyan R.K. Simulated of earthquake wave compatible with design spectrum. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 110-127. DOI: 10.46698/VNC.2025.25.83.001

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2025.25.83.001

Оригинальная статья

Моделирование сейсмических воздействий в соответствии с нормативными спектрами реакции

Дж.К. Карапетян[✉], Л.Х. Оганесян[✉], Р.К. Карапетян[✉]

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

Статья поступила: 08.08.2025, доработана: 15.09.2025, принята к публикации: 19.09.2025

Резюме: Актуальность работы. Синтетические акселерограммы крайне важны для сейсмостойкого проектирования, особенно в регионах с ограниченным количеством записей сильных движений. В Армении недостаток таких данных затрудняет точную оценку сейсмической опасности и конструктивный расчет сооружений. **Цель исследования.** Данное исследование направлено на разработку новой методики генерации синтетических акселерограмм на основе нормативных спектральных кривых, что позволит компенсировать нехватку данных о сильных землетрясениях в Республике Армения. **Методы.** В основу методики положена единственная запись сильного движения от Спитакского землетрясения 07.12.1988, дополненная данными о более слабых местных землетрясениях ($M_w \geq 3.5$). Путем накопления и обработки этих записей синтезируются акселерограммы, достоверно отражающие амплитудно-частотные характеристики для различных грунтовых условий. Для генерации акселерограмм, соответствующих спектральным кривым, было разработано специализированное программное обеспечение. **Результаты.** Предложенный подход позволяет экстраполировать сильные акселерограммы на разные регионы Армении и использовать их при построении карт сейсмической опасности, включая распределение ускорений и спектры реакции. Данный подход повышает точность прогнозирования движений по сравнению с традиционными динамическими кривыми, лишёнными прямой эмпирической основы. Сгенерированные акселерограммы могут применяться при инженерном анализе, адекватной оценке опасности и уточнении нормативных документов сейсмостойкого проектирования. Несмотря на то, что методика разработана для Арменийских сейсмических норм (СН АР), она может быть адаптирована к другим международным стандартам, что расширяет ее значимость для мировой инженерной сейсмологии.

Ключевые слова: синтетические акселерограммы, оценка сейсмической опасности, спектры отклика, грунтовое усиление, Спитакское землетрясение, правила сейсмического проектирования, движения грунта совместимые со спектром.

Для цитирования: Карапетян Дж.К., Оганесян Л.Х., Карапетян Р.К. Моделирование сейсмических воздействий в соответствии с нормативными спектрами реакции. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 110-127. DOI: 10.46698/VNC.2025.25.83.001

Introduction

The development of a set of computed accelerograms is a highly relevant and pressing issue, particularly in the seismically active region of the Republic of Armenia. This necessity arises due to the lack of a comprehensive strong-motion database. Notably, during the catastrophic Spitak earthquake on December 7, 1988 (M_w 7.0), it was

practically impossible to record accelerograms due to the extreme conditions of the event. During this earthquake, only a single accelerogram was recorded in the epicentral zone at the Gyukasyan station, where the PGA was measured at 0.21g (as shown in fig. 1). However, this isolated recording does not adequately represent the overall strong-motion characteristics of the event, highlighting the urgent need for a more robust database of strong earthquake records. These limitations highlight the necessity of seismic zonation maps for Armenia (see fig. 2).

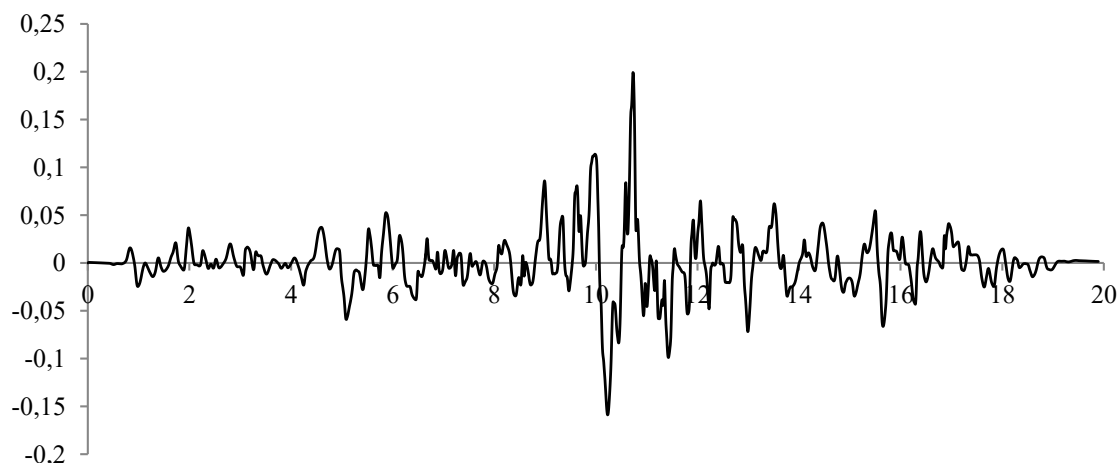


Fig. 1. Time-series plot of ground motion from the Spitak Earthquake (M_s 7.0, December 7, 1988). The x-axis represents time (0–20s), while the y-axis shows amplitude variations. A distinct peak around 10s indicates the main seismic event, followed by decaying oscillations

It is well known that during strong earthquakes, ground accelerations often exceed 0.4g. Given this, our objective is to generate computed accelerograms using records from relatively weak earthquakes in this region. These computed accelerograms will serve as a critical foundation for the development of seismic hazard assessment maps for the Republic of Armenia. This task is particularly significant because seismic hazard maps, expressed in fractions of g, have been compiled at different times for the territory of Armenia. These maps typically delineate three primary hazard zones, corresponding to peak accelerations of 0.3g, 0.4g, and 0.5g the regulatory classification of these hazard zones is summarized in table 2. By generating calculated accelerograms, we aim to enhance the accuracy and reliability of these assessments, contributing to more effective seismic risk mitigation strategies.

the highest hazard zones. Major fault lines and tectonic structures appear to influence these zones. By generating calculated accelerograms, the goal is to refine seismic hazard assessments, improving risk mitigation strategies for future earthquakes. The question of how the PGA (Peak Ground Acceleration) values were determined, which models of $PGA = f(M, R, V_s)$ were applied, and how their justification was established remains unresolved. Notably, the 2020 updated seismic construction standards incorporated a seismic hazard assessment map, delineating three primary hazard zones with PGA values of 0.3g, 0.4g, and 0.5g. These values were derived using international empirical models, whose accuracy is known to vary by a factor of up to two. This discrepancy is evident even when analyzing the PGA zonation, where Gyumri (formerly Leninakan) was assigned to Zone 2, while Vanadzor was categorized as Zone 3, the highest hazard level (see fig. 2). However, historical data from the 1988 Spitak earthquake contradicts this classification, as

damage was more severe in Leninakan than in Kirovakan (Vanadzor), a fact documented in the Unified Summary Report on the Spitak Earthquake (1988) (Scientific and technical report, Spitak earthquake of December 7, 1988 (in two parts), part II, IGES NAS RA funds 1990).

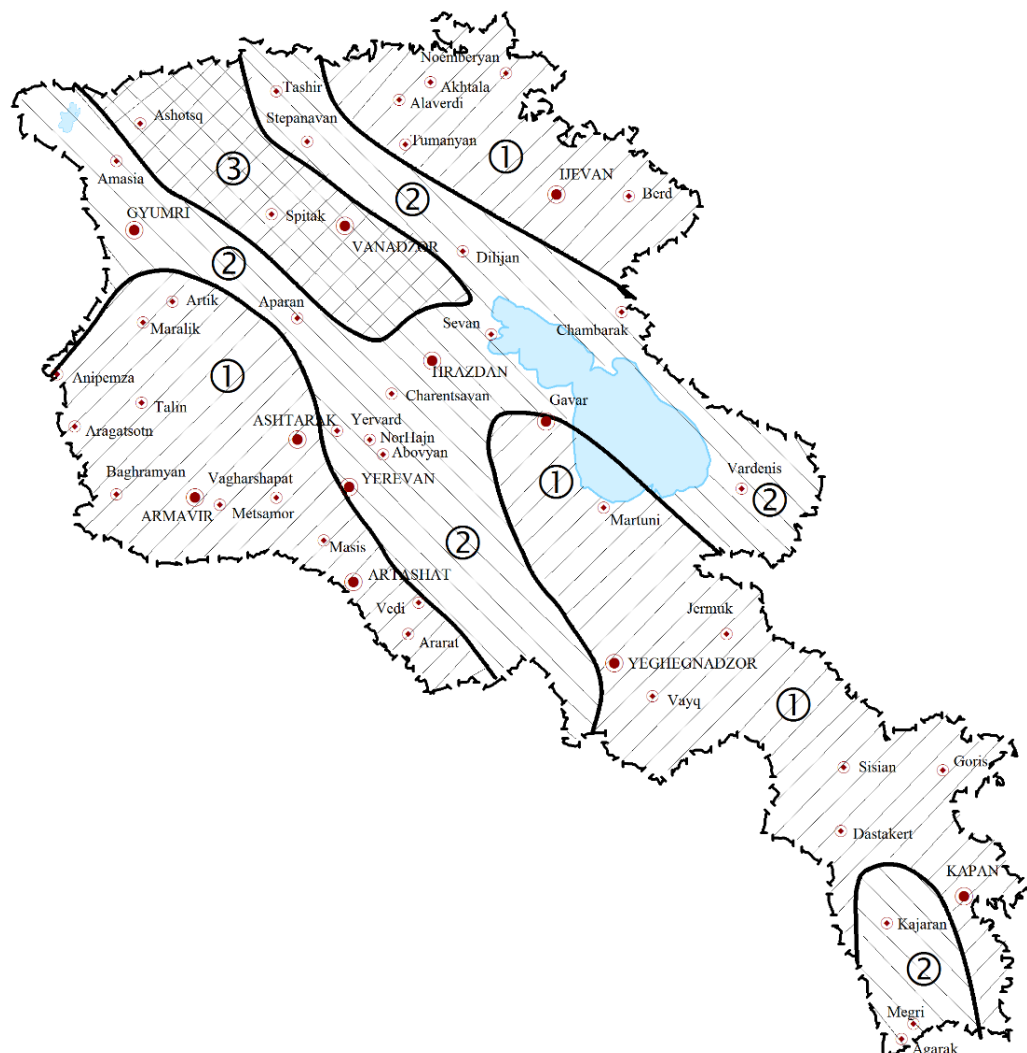


Fig. 2. Seismic hazard zonation map of Armenia by expected PGA values (0.3g, 0.4g, 0.5g)[BSRA ..., 2020]

The map represents seismic hazard zones in Armenia, categorized by expected peak ground accelerations of **0.3g, 0.4g, and 0.5g**. The shaded and numbered regions indicate varying levels of seismic risk, with darker or crosshatched areas likely representing Another noteworthy aspect of these standards is the inclusion of a dynamic curve (see fig. 3), which essentially represents a response spectrum. However, the spectrum values are presented as dimensionless quantities, essentially reflecting the ratio of the response spectrum to the peak acceleration value. Furthermore, the standards specify that seismic resistance calculations for buildings should be performed using computed accelerograms, yet no clear methodology is provided for how these calculations should be conducted. Given these uncertainties, we have set out to develop a comprehensive set of accelerograms based on response spectra, utilizing specific spectral curves (dynamic curves) as a foundation for our approach.

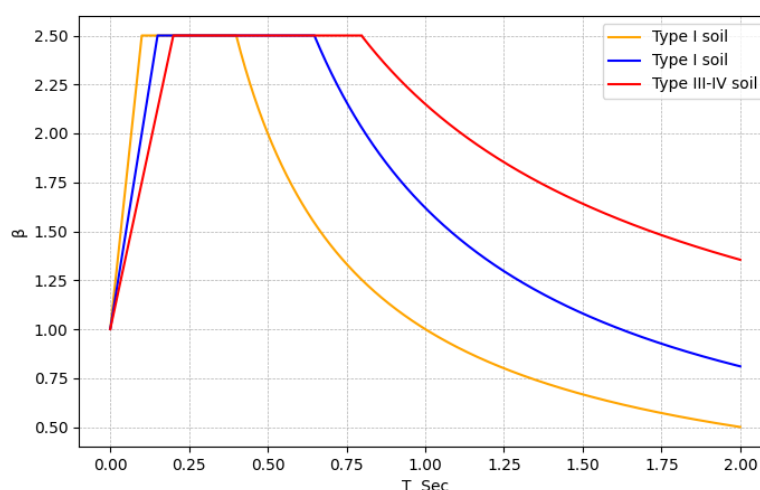


Fig. 3. Spectral amplification characteristics $\beta(T)$ for different soil types [BSRA ..., 2020]

The graph displays soil-dependent spectral amplification factors (β) as a function of period (T , in seconds). Three curves represent different soil types: For short periods ($T < 0.25$ s), as illustrated by the spectral amplification curves (see fig. 3 and table 1). All soil types show a rapid increase in β , reaching a plateau around $\beta=2.5$. For longer periods, the amplification factor decreases, with **Type III-IV soil** maintaining the highest values, followed by **Type II soil**, and **Type I soil** showing the steepest decline. The plot suggests that softer soils (Type III-IV) exhibit stronger amplification at longer periods, influencing seismic design considerations.

Table 1

Spectral amplification factor $\beta(T)$ for different soil types

Soil Type I	Soil Type II	Soil Type III-IV
$\beta = 1 + 15T$, when $0 < T < 0.1$ $\beta = 2.5$, when $0.1 \leq T \leq 0.4$ $\beta = \frac{1}{T}$, when $T \geq 0.4$	$\beta = 1 + 10T$, when $0 < T < 0.15$ $\beta = 2.5$, when $0.15 \leq T \leq 0.65$ $\beta = \frac{1.62}{T}$, when $T \geq 0.65$	$\beta = 1 + 7.5T$, when $0 < T < 0.2$ $\beta = 2.5$, when $0.2 \leq T \leq 0.8$ $\beta = \frac{1.622 \cdot 15}{T^{2/3}}$, when $T \geq 0.8$

From this spectrum, it is immediately apparent that within the period range of $T = 0.1$ – 0.8 sec, the amplitude levels remain identical across different soil conditions. This is inconsistent with reality, as no seismic standards utilize such curves where spectral amplitudes for different soil types remain at the same level. Moreover, the most intriguing aspect is how these curves were derived in the absence of strong motion recordings – a question that remains unresolved. The observed discrepancies can be attributed to the lack of a strong earthquake accelerogram database for the Republic of Armenia. Despite these shortcomings, at this stage of our research, we adopt these curves as a basis and conduct all subsequent analyses accordingly. Our research utilizes the only available strong motion record from the 1988 Spitak earthquake. Similar challenges in seismic hazard assessment have been reported in regional studies. For example, [Chernov, 2023, 2024] demonstrated the importance of spectral analysis in evaluating hazard levels. However, as is well known among seismologists and earthquake engineering specialists, this record does not fully represent the reality of seismic events of such magnitude. Nevertheless, our approach is highly flexible, allowing the incorporation of other strong

motion recordings. The selection of this particular record was intentional, as it presents an intriguing opportunity to examine how its application to normative spectral curves influences results. Specifically, we investigate the changes in the amplitude-frequency characteristics of waveforms and derive recommendations based on these findings. This is particularly significant for structural design, as high-rise buildings exceeding 16 floors rely on these standard spectral curves.

The response spectrum is a fundamental concept in evaluating the dynamic effects of earthquakes on civil engineering structures. Consequently, seismic design codes worldwide have adopted response spectra as a standard tool for defining design parameters. By ensuring that structures are designed to withstand seismic events with predefined spectral characteristics, this methodology provides an effective framework for earthquake-engineering. In practice, the irregular shape of real earthquake ground motion spectra is often smoothed for design applications [Chopra, 2017], providing a more uniform basis for structural analysis. This process typically involves assessing the response of various structural vibration modes while considering factors such as damping, ductility, and nonlinear behavior [Fardis, 2009; Priestley et al., 2007].

However, relying solely on response spectra may not provide a comprehensive structural assessment. While they are useful in many scenarios, response spectra do not fully capture complex behaviors such as damage progression, hysteretic deterioration, inelastic response, and second-order effects—critical factors in understanding the realistic performance of structures under seismic loads [Krawinkler, Seneviratna, 1998]. To address these limitations, time history analysis, which utilizes accelerograms, serves as a vital complement to response spectrum analysis [Saragoni, Hart, 1974]. Since real accelerograms often exhibit irregular spectra that may not align with code-defined design spectra, generating spectrum-compatible accelerograms has become essential in modern earthquake engineering [Al Atik et al., 2010].

Over the years, various methods have been developed to generate spectrum-compatible accelerograms. These methods generally fall into two categories: modifying recorded ground motions to match a target design spectrum or generating synthetic accelerograms from scratch [Gasparini, Vanmarcke, 1976]. Deterministic approaches employ harmonic superposition to create nonstationary signals [Li et al., 2021], while wavelet-based techniques modify recorded motions to conform to the required response spectrum [Chen et al., 2021]. Stochastic approaches, originally introduced by Vanmarcke and Gasparini [Vanmarcke, 1979; Gasparini, Vanmarcke, 1976; Rezaeian, Der Kiureghian, 2010] model accelerograms as Gaussian processes, establishing a link between the response spectrum and the power spectral density function. More recently, artificial intelligence techniques, such as neural networks, have been explored for generating spectrum-compatible accelerograms. In addition to classical approaches [Saragoni, Hart, 1974], several recent studies have introduced advanced techniques for generating spectrum-compatible accelerograms, including Matlab-based codes [Ferreira et al., 2020], wavelet-based methods [Ferreira et al., 2020; Li et al., 2021], stochastic multi-step approaches [Dabaghi, Der Kiureghian, 2017; Vanmarcke, 1979]; neural networks and iterative schemes accounting for site effects [Huang, Wang, 2017].

In this paper, we introduce a method for generating spectrum-compatible accelerograms, specifically tailored to the Armenian Seismic Code. Our approach modifies recorded ground motion data to align with target design spectra. The method involves computing the initial response spectrum and using Fourier transforms to adjust the frequency content

of the ground motion until the final accelerogram matches the design spectrum. This technique provides an efficient and accessible tool for researchers and practitioners, easily integrating into Python programs or other seismic analysis software. By offering this tool, we aim to facilitate its application in nonlinear structural analysis and seismic control systems while ensuring compliance with the updated requirements of the Armenian seismic code.

Methods

Response spectra determination differential equation solver

The response spectrum is defined as the peak response of a single degree-of-freedom structure with different natural frequencies for a specified damping coefficient ζ subject to a given ground accelerogram $\ddot{u}_g(t)$. To determine the response spectra, the following steps need to be performed:

- Specify the natural period range P to be analyzed and determine the corresponding natural angular frequencies ω ($\omega = 2\pi/P$);
- For all frequencies ω within the range, solve the dynamic differential equation (Equation 1) in the time domain (t).
- The acceleration response spectra are then defined as the maximum structural response for the given accelerogram and for each period $S_a(P) = \text{Max}|\ddot{u}_t|$

The acceleration response spectra are the most commonly used for structural design and, for this reason, will be used in this work.

$$\ddot{u}(t) + 2\zeta\omega\dot{u}(t) + \omega^2u(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

where, $u(t)$ is the time-dependent structural displacement.

Considering the state space formulation using the vector x defined as $x = \begin{bmatrix} u \\ \dot{u} \end{bmatrix}$, the second-order equation (Equation 1) is replaced with a first order:

$$\dot{x} = Ax + B\ddot{u}_g \quad (2)$$

The matrices A and B are defined by

$$x = \begin{bmatrix} u \\ \dot{u} \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\omega^2 & -2\zeta\omega \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

where, I is the identity matrix.

The dynamic equation has an analytical solution for a given time step Δt .

$$x(t + \Delta t) = e^{\Delta t A}x(t) + \int_t^{t+\Delta t} e^{[(t+\Delta t)-\zeta]A}B\ddot{u}_g(\zeta)d\zeta \quad (4)$$

Assuming that the ground acceleration has a linear variation within each time step, the dynamic time history analysis can be performed using the following equation:

$$x(t + \Delta t) = K_b x(t) + K_b B \ddot{u}_g(t) + K_{\Delta f} B [\ddot{u}_g(t + \Delta t) - \ddot{u}_g(t)] \quad (5)$$

were

$$K_b = e^{\Delta t A}; K_f = A^{-1}(K_b - I); K_{\Delta f} = A^{-1}(K_f - I) \quad (6)$$

Code-defined response spectra in accordance with Armenian seismic norms

The formulation of the response spectrum is a fundamental component of seismic

hazard assessment, providing a quantitative framework for evaluating the seismic demand on structures. In this study, the spectral definition adheres to the Armenian Seismic Construction Norms [Armenian Seismic Norms 20.04-2020], which prescribe seismic design spectra based on probabilistic seismic hazard analysis, local soil conditions, and structural characteristics. These norms replace the Eurocode 8 (EC8) (EN 1998-1:2004 + A1:2013 (Eurocode 8). Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels. CEN. 231 p.) classification and introduce a region-specific methodology for defining seismic response spectra.

Seismic hazard classification

Armenian seismic regulations categorize the seismic hazard level into three seismic zones, each associated with a predefined peak ground acceleration (PGA):

$$a_g = \begin{cases} 300\text{cm/s}^2, & \text{for Zone 1} \\ 400\text{cm/s}^2, & \text{for Zone 2} \\ 500\text{cm/s}^2, & \text{for Zone 3} \end{cases}$$

These values correspond to a 475-year return period with a 10% probability of exceedance within a 50-year timeframe, consistent with international seismic risk assessment practices.

Soil classification and site-specific seismic amplification

Unlike EC8, which defines five soil categories (A–E), the Armenian seismic norms classify soils into four categories (I–IV) based on shear wave velocity (V_s), dynamic response properties, and geotechnical characteristics. A detailed description of soil categories, shear wave velocities, and examples is provided in table 2 and 3.

Table 2

Seismic hazard zones of Armenia and corresponding PGA values according to Norms 20.04-2020 [BSRA ..., 2020]

Soil Type	Description	Shear Wave Velocity V_s (m/s)	Examples
I	Hard rock, igneous formations	$V_s \geq 850$	Igneous rock, dense formations
II	Stiff to medium-dense soil	$450 \leq V_s < 850$	Dense sands, gravels, weathered rock
III	Soft soil deposits	$180 \leq V_s < 450$	Loose sands, soft clays, alluvial deposits
IV	Very soft soils prone to liquefaction	$V_s < 180$	Peat, organic clay, saturated sediments

This table defines the seismic hazard zones prescribed by Armenian Seismic Norms (Armenian Seismic Norms 20.04-2020). The peak ground acceleration (PGA) values correspond to a 475-year return period with a 10% probability of exceedance in 50 years. The PGA values are assigned based on the region's seismic hazard classification, which is divided into three zones. For sites with significant stratigraphic variation, the effective site classification is determined based on the weighted average shear wave velocity over the upper 30 meters of soil, following:

$$V_{s30} = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s,i}}} \quad (7)$$

where: H is the total thickness of the soil layers (30 m), h_i and $V_{s,i}$ are the thickness and shear wave velocity of the i -th layer.

Seismic response spectrum formulation

The spectral acceleration function in the Armenian norms follows the standard form:

$$S_a(T) = A \cdot k_0 \cdot \beta(T) \cdot g \quad (8)$$

where: A is the seismic hazard factor corresponding to the designated seismic zone, k_0 is the soil amplification coefficient that accounts for local site effects, $\beta(T)$ is the dynamic amplification function, which depends on the fundamental period T of the structure, g is the acceleration due to gravity. The soil amplification coefficient k_0 modifies the peak ground acceleration according to the local soil conditions:

Table 3

**Soil classification in Armenian Seismic Norms (20.04-2020)
with amplification coefficients**

Soil Type	Seismic Zone 1	Seismic Zone 2	Seismic Zone 3
I (Rock)	0.8	0.8	0.8
II (Dense sand/gravel)	1.0	1.0	1.0
III (Medium-density clays)	1.1	1.0	1.0
IV (Soft, water-saturated soil)	1.2	1.1	1.0

This scaling factor ensures that soft soils amplify seismic motion to a greater extent than stiff soils, in accordance with empirical ground motion records and theoretical site response models. For each soil type, a specific amplification function $\beta(T)$ is used:

$$\beta(T) = \begin{cases} 1 + \frac{T}{T_B}, & 0 \leq T < T_B \\ \beta_0, & T_B \leq T \leq T_C \\ \beta_0 \frac{T_C}{T}, & T_C \leq T \leq T_D \end{cases}$$

where: T_B, T_C, T_D , define spectral shape regions per soil type, β_0 is the maximum spectral amplification factor, which varies between 2.5 and 3.5.

Structural damping considerations

In line with standard seismic engineering practices, Armenian norms adopt a viscous damping ratio of $\xi=5\%$ as the reference value for response spectrum calculations. The damping-adjusted spectral modification is applied using a correction function:

$$\eta(\xi) = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \quad (9)$$

where $\eta(\xi)$ accounts for the influence of damping on spectral ordinates, ensuring compliance with realistic structural damping behavior.

Seismic Event Characterization: Near-Field vs. Far-Field Earthquakes

While EC8 differentiates between Type 1 (far-field) and Type 2 (near-field) earthquakes,

Armenian norms implicitly incorporate earthquake duration and site-specific spectral adjustments. The duration of synthetic accelerograms is prescribed as follows:

$$T_d = \begin{cases} 20s, & \text{for Zone 1} \\ 25s, & \text{for Zone 2} \\ 30s, & \text{for Zone 3} \end{cases}$$

This criterion ensures that seismic simulations account for the longer ground shaking duration associated with higher seismic hazard zones, aligning with empirical earthquake recordings.

Based on table 3, the soil-condition coefficients k_0 vary in the first seismic zone (PGA = 0.3g). In the second zone, k_0 changes only for Soil Category IV (to 1.1). In the third and most severe zone (PGA = 0.5 g), the coefficients are left unchanged $k_0 = 0.8$ for Category I and $k_0 = 1.0$ for all other categories. This pattern appears ad hoc, seemingly to prevent the design acceleration from exceeding 0.5g.

A second concern is the assigned durations of the artificial accelerograms 20 sec for Zone 1, 25 sec for Zone 2, and 30 sec for Zone 3. This approach is questionable, because the duration of strong motion in damaging earthquakes spans a broad range. Since these choices directly affect the design of earthquake-resistant buildings and structures, both the coefficients and the durations should be re-examined and replaced with values that better represent actual strong-motion behavior, taking into account not only local site conditions but also the general characteristics of large earthquakes.

Artificial accelerogram generator

Algorithm fundamentals

The generation of an artificial accelerogram to match code-defined spectra (either based on the modification of real or synthetic accelerograms) can be stated as an optimization problem in which the response spectra are to be matched as close as possible to the defined spectra. The wavelet-based formulations proposed by [Ferreira et al., 2020; Li et al., 2021] provide additional justification for the use of time-frequency domain methods in developing spectrum-compatible accelerograms. In order to solve the problem, it is representative to use the Fourier Transform in order to have the frequency content of the signal. The Fourier Transform $\ddot{U}_g(\omega)$ of the time history function $\ddot{u}_g(t)$ is defined as:

$$\ddot{U}_g(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \ddot{u}_g(t) e^{-i\omega t} dt \quad (10)$$

The response spectra in a given frequency ω (or period P) can be stated as being proportional to the power a of the Fourier Transform value at the same frequency. The value of k and α are heavily dependent on the type of earthquake:

$$S_a(\omega) \propto k \ddot{U}_g(\omega)^\alpha \quad (11)$$

For very high frequencies, the response spectra converge to the value of the PGA:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} S_a(\omega) = \max |\ddot{u}_g(t)| \quad (12)$$

To match the code-defined response spectrum, the Fourier amplitude spectrum is iteratively modified using the ratio of the **target** and **computed** response spectra:

$$\tilde{U}_g^{(n+1)}(\omega) = \tilde{U}_g^{(n)}(\omega) \cdot \frac{S_a^{target}(\omega)}{S_a^{computed}(\omega)} \quad (13)$$

Where S_a^{target} is the response spectrum of the current iteration, $S_a^{computed}$ is the Armenian design spectrum.

Finally, an **inverse Fourier transform (IFFT)** reconstructs the modified accelerogram:

$$\ddot{u}_g^{(n+1)}(t) = \mathbf{F}^{-1} \left\{ \tilde{U}_g^{(n+1)}(\omega) \right\} \quad (14)$$

This iterative process continues until the convergence criterion is satisfied, namely

$$\max \left| \frac{S_a^{computed}(T) - S_a^{target}(T)}{S_a^{target}(T)} \right| < 5\% \quad (15)$$

which ensures that the final artificial accelerogram is spectrum-compatible according to the Armenian Seismic Norms 20.04-2020.

A frequency-dependent soil propagation model

The propagation of ground vibrations through soil is governed by complex interactions between geometric attenuation and material damping. Geometric attenuation results from the natural spreading of wave energy as it propagates outward, while material damping accounts for energy dissipation due to the internal friction and viscoelastic behavior of the soil. This paper presents a frequency-dependent soil propagation model that incorporates both attenuation mechanisms, enabling precise estimation of vibration transmission for engineering and seismological applications.

Ground vibrations propagate through Rayleigh (surface) waves and body waves (shear and compressional waves). The general expression describing the attenuation of vibration amplitude from a source at distance r_a to a receiver at distance r_b is:

$$v_b = v_a \left(\frac{r_a}{r_b} \right)^\gamma e^{\alpha(r_a - r_b)} \quad (16)$$

Where v_a and v_b are the vibration velocities at points a and b, respectively, γ is the geometric attenuation coefficient, which varies depending on wave type, α is the material damping coefficient, which accounts for energy dissipation.

Geometric attenuation occurs due to wavefront expansion as the energy propagates outward. The coefficient γ depends on the wave type and can be determined from theoretical models of wave radiation in an elastic half-space. For common vibration propagation scenarios, the values of γ are summarized in Table 4. These values have been validated through experimental measurements and empirical studies in vibration control, seismic wave analysis, and construction engineering, such as those by [Richart et al., 1970; Barkan, 1962; Dowding, 1996]. They are widely used in engineering practice for modeling vibration propagation and predicting the impact of ground motion on structures.

Rayleigh waves, which dominate surface propagation, exhibit the lowest attenuation ($\gamma=0.5$), corresponding to 3 dB per doubling distance. Body waves attenuate more rapidly, with surface measurements showing $\gamma=2.0$ (12 dB per doubling distance) and depth measurements yielding $\gamma=1.0$ (6 dB per doubling distance). These coefficients are essential for modeling ground vibration propagation, particularly in site-specific assessments (table 4).

Table 4

Theoretical geometric attenuation coefficients (γ) for different wave types and measurement locations

Wave Type	Measurement Location	γ	Attenuation (dB/doubling distance)
Rayleigh Waves	Surface	0.5	3
Body Waves	Surface	2.0	12
Body Waves	Depth	1.0	6

The attenuation due to geometric spreading is expressed in logarithmic form as:

$$A_\gamma = 20_\gamma \log_{10} \left(\frac{r_a}{r_b} \right) \quad (17)$$

Material damping describes energy dissipation mechanisms within the soil, primarily due to internal friction and hysteretic behavior. Several damping parameters are commonly used in engineering and geophysics, including the loss factor (η), the damping ratio (ζ), the resonance amplification factor (Q), and the logarithmic decrement (δ). These parameters are related by the following expressions:

$$\eta = 2\zeta = \frac{\delta}{\pi} = \frac{1}{Q} \quad (18)$$

Richart, Hall and Woods [1970] define the relationship between α and these material coefficients as shown in

$$d = \frac{2\rho c a}{w} = l a = \frac{c a}{f} \quad (19)$$

The material damping coefficient α is related to these damping parameters by:

$$\alpha = \frac{h \rho f}{c} \quad (20)$$

Where f is the vibration frequency (Hz) c is the wave velocity in the medium. Since η and c are often assumed constant for a given soil type, a soil-specific attenuation parameter is introduced:

$$\rho = \frac{\eta}{c} \quad (21)$$

which allows the material damping coefficient to be rewritten as:

$$\alpha = r \rho f \quad (22)$$

Woods and Jedgele [Woods, Jedgele, 1985] have proposed a classification of soil by attenuation coefficient. A comparative overview of soil types and their attenuation parameters is given in table 5. [Dowding, 1996] summarizes this in terms of ranges of α at 5 Hz and 50 Hz, but if one uses Equation (22) as a definition of α , one can arrive at a tabulation of ρ as a function of earth material type. This is given in table 5. The constant ρ can be used in propagation models of the form given in Equation (23).

$$\frac{V_b}{V_a} = \left(\frac{r_a}{r_b} \right)^g e^{r \rho f (r_a - r_b)} \quad (23)$$

The vibration attenuation (in dB) between points “a” and “b” can be stated in the form of Equation (24).

$$\text{Attenuation} = VL_b - VL_a = 20 \log \left(\frac{v_b}{v_a} \right) \quad (24)$$

This formulation highlights the frequency dependence of attenuation, showing that higher-frequency components decay more rapidly than lower-frequency components. The total attenuation between two points a and b can be expressed as the sum of geometric attenuation and material damping:

$$\text{Attenuation (A)} = A_\gamma + A_\alpha \quad (25)$$

where:

$$A_\alpha = 8.68 \times \alpha \times (r_a - r_b) \quad (25a)$$

$$A_\gamma = 20 \times \gamma \times \log_{10} \left(\frac{r_a}{r_b} \right) \quad (25b)$$

This equation explicitly accounts for both distance-dependent and frequency-dependent attenuation, making it applicable for practical engineering assessments and site-specific vibration modeling. The factor 8.68 in the attenuation equation converts the natural exponential decay into decibel (dB) form, facilitating the use of the material damping coefficient (α) in vibration attenuation models expressed in dB. This conversion aligns with standard practices in vibration engineering and geophysics.

Measurement of site-specific attenuation

To determine the site-specific damping ρ , the following procedure is followed:

1. Field Measurements: Vibration spectra are recorded at two distances r_a and r_b from a known source.

2. Transfer Function Calculation: The spectral difference (in decibels) between the two measurement points is computed.

3. Geometric Attenuation Subtraction: The term A_γ is subtracted from the transfer function.

4. Material Damping Extraction: The remaining attenuation component is attributed to material damping and used to solve for ρ :

$$r = \frac{a}{\rho f}$$

5. Attenuation Curve Construction: The frequency-dependent attenuation curve is generated using:

$$A_\alpha = 8.68 r \rho f (r_b - r_a)$$

6. Validation and Model Fit: The measured data is compared against the theoretical attenuation curve to ensure consistency.

Table 5

Soil classification by attenuation coefficient α and correspondence with Armenian seismic norm categories

Seismic Soil Classification (Armenian Seismic Norms 20-04-2020)	Description of Material	Attenuation Coefficient α (ft^{-1} at 5 Hz)	ρ (Soil Property Parameter)
I – Rock formations, igneous and metamorphic bedrock	Hard, competent rock: bedrock, fresh solid rock	< 0.0001	$< 6 \times 10^{-6}$
II – Dense sands, weathered rock, well-compacted soils	Hard soils: dense sand, consolidated clay, glacial till	$0.0001-0.001$	$6 \times 10^{-6} - 6 \times 10^{-5}$
III – Medium-density sands and silty clays, compacted fill	Competent soils: silty clays, sandy clays, gravel, weathered rock, compacted fill	$0.001-0.003$	$6 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-4}$
IV – Soft, water-saturated sands, organic soils, loess	Weak or soft soils: loose sand, loess, peat, recently plowed ground, organic soils, topsoil	$0.003-0.01$	$2 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$

Table 5 provides an overview of soil classifications based on their attenuation properties and correlates them with the seismic soil classifications from the Armenian seismic construction norms (Armenian Seismic Norms 20-04-2020). The aim is to integrate **geophysical attenuation coefficients** with **engineering soil categories**, making it easier to apply in practical seismic hazard assessments.

Results and Discussion

The following section presents the main results obtained from the generation of spectrum-compatible artificial accelerograms and their comparison with the existing Armenian seismic norms. The calculated ground motions are analyzed across different soil categories (I–IV), and their spectral characteristics are compared with code-defined response spectra. Special attention is given to the discrepancies identified between the current regulatory maps of peak ground acceleration (PGA) and the actual damage distribution observed during the 1988 Spitak earthquake. The discussion highlights both the applicability of the proposed methodology and its limitations, providing a critical basis for improving seismic hazard assessment and updating design regulations. This discrepancy between normative PGA maps and actual earthquake damage has also been discussed in regional studies [Zaalishvili et al., 2022, 2024; Chernov, 2023; Fidarova et al., 2023], confirming the necessity of updating hazard assessments based on both empirical evidence and simulated motions.

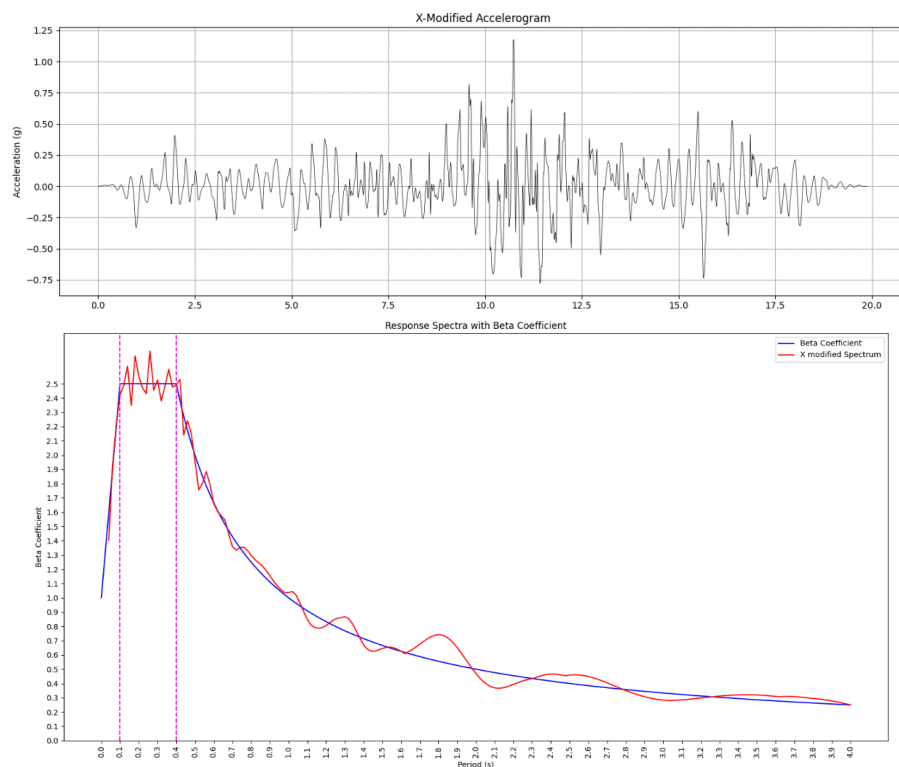


Fig. 4. Modified seismic response of the 1988 Spitak Earthquake for Soil Type I

The adjusted response for Soil Type I is shown in fig. 4, while results for Soil Type II and Soil Types III–IV are presented in fig. 5 and fig. 6, respectively.

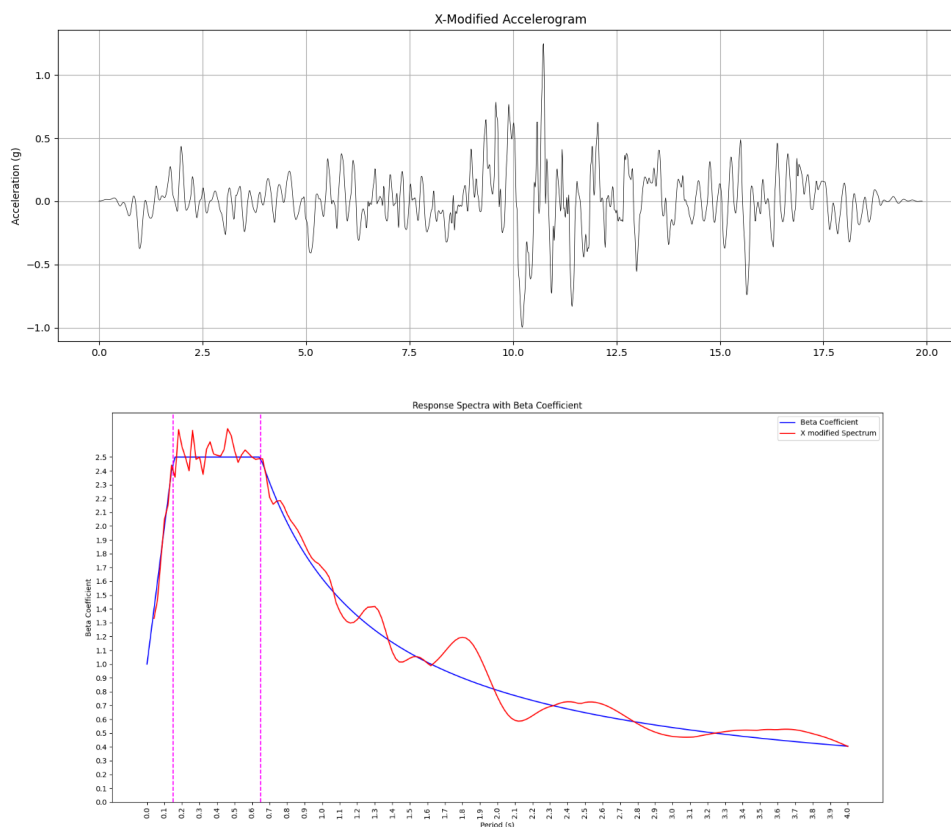


Fig. 5. Modified seismic response of the 1988 Spitak Earthquake for Soil Type II

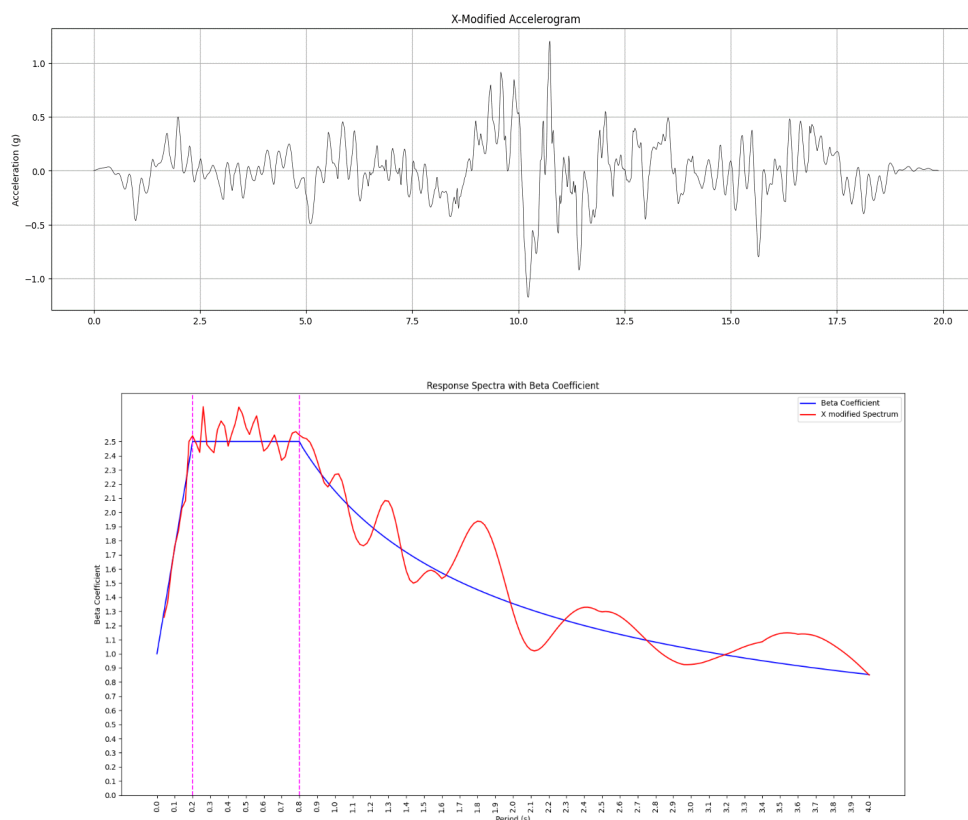


Fig. 6. Modified seismic response of the 1988 Spitak Earthquake for Soil Types III–IV

The vibration analysis of advanced technology facilities must account for both the frequency and amplitude of vibrations. A soil propagation model has been developed to incorporate site-specific, measurable, frequency-dependent attenuation characteristics. Additionally, a method has been introduced for the in-situ determination of these frequency-dependent properties, enabling more accurate assessment of vibration behavior. Comparable results have been obtained in stochastic modeling approaches, such as the multi-step framework proposed by [Dabaghi, Der Kiureghian, 2017], which showed that soil-dependent amplification can significantly affect the spectral response.

Conclusion

A new approach to calculating artificial accelerograms based on spectral normative curves corresponding to different soil categories is proposed. Based on these calculations, the only record of strong movements of the Spitak 07.12.1988 earthquake on the territory of the Republic of Armenia was laid down. What is important is that the obtained calculated records differ not only in amplitude, but also in the frequency of appropriateness for soft and hard soils. In the future, when accumulating accelerograms of earthquakes of medium strength starting from 3.5 magnitudes, this method can be used to obtain accelerograms of strong movements in different areas of the territory of the Republic of Armenia for different categories of soils. These results allow us to obtain calculated accelerograms close to reality, which can be used to compile not only new normative maps, but also to obtain new spectral curves, and in the future to use more accurate normative curves, and not some dynamic curves presented as spectral curves. These findings are directly related to the refined hazard maps and spectral response curves (see fig. 2 and fig. 3). Based on

these results, software was developed that allows one to obtain calculated accelerograms based on spectral curves and which can be used to calculate buildings and structures of various structural systems. Additionally, we conducted a focused review of selected standards provisions that are especially critical for seismic building design. The article provided some valuable critical discussions that could be taken into account in the future when drafting new regulations. The methodology for computing artificial accelerograms follows a multi-step approach integrating spectral normative curves, stochastic simulation techniques, and validation against observed seismic records. The process consists of the following key stages:

The spectral acceleration values are defined for different soil types, considering soil amplification factors derived from empirical ground motion models and local seismic norms. The curves incorporate site-specific modifications to ensure a realistic representation of the seismic response across various geological conditions. The Fourier transform is applied to match the frequency content of the synthetic waveforms with the prescribed response spectra. The importance of including site effects in accelerogram generation was also emphasized in recent work by [Huang, Wang, 2017], who demonstrated that frequency-dependent attenuation models improve compatibility with observed response spectra. The findings are consistent with recent advances in spectrum-compatible ground motion generation [Ferreira et al., 2020; Huang, Wang, 2017], confirming that the proposed methodology aligns with international trends and can be adapted for broader applications. This iterative frequency-domain modification ensures that the final accelerogram is spectrum-compatible while preserving realistic ground motion characteristics. A computational tool was developed to automate the generation of spectrum-compatible accelerograms, integrating the proposed methodology into a software framework. This tool allows for site-specific seismic analysis, enabling engineers to perform nonlinear structural assessments based on computed ground motions. The software ensures compliance with the Armenian Seismic Code while allowing adaptability to international seismic standards.

References

1. Al Atik L., Abrahamson N.A., Bommer J.J., Scherbaum F., Cotton F., Kuehn N. The variability of ground-motion prediction models and its components. *Seismological Research Letters*. 2010. Vol. 81. Issue 5. pp. 794–801. DOI: 10.1785/gssrl.81.5.794.
2. Barkan D.D. *Dynamics of bases and foundations*. New York. McGraw-Hill. 1962. 434 p.
3. BSRA-20.04-2020 – Earthquake Engineering. Design standards, Republic of Armenia. 2020. 93 p.
4. Chen G., Zhu Z., Hu J. Simulation of response spectrum-compatible ground motions using wavelet-based multi-resolution analysis. *Measurement and Control*. 2021. Vol. 54. Issue 5–6. pp. 641–646. DOI: 10.1177/00202940211013057.
5. Chernov Y.K. On estimates of vibration spectra and spectral characteristics of soils for probabilistic seismic hazard analysis of territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 67–81. DOI: 10.46698/VNC.2023.67.36.006. (In Russ.)
6. Chernov Yu.K. Rapid estimates experience of reaction spectra based on Fourier spectra of accelerations of ground motions during earthquakes. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 113–127. DOI: 10.46698/VNC.2024.44.23.010. (In Russ.)
7. Chopra A.K. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Upper Saddle River, NJ. Prentice Hall. 2017. 920 p.
8. Dabaghi M., Der Kiureghian A. Stochastic model for simulation of near-fault ground motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2017. Vol. 46. Issue 6. pp. 963–984. DOI: 10.1002/eqe.2839.

9. Dowding C.H. Construction Vibrations. Englewood Cliffs, NJ. Prentice-Hall. 1996. 610 p.
10. Fardis M.N. Seismic design, assessment and retrofitting of concrete buildings. Springer. Dordrecht. 2009. 744 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-9842-0.
11. Ferreira M.A., Oliveira C.S., Sousa M.L. An artificial accelerogram generator code written in MATLAB. Engineering Reports. 2020. Vol. 2. Issue 10. Art. No. e12129. DOI: 10.1002/eng2.12129.
12. Fidarova M.I., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Correlation between the magnitude of macroseismic intensity and various indicators of instrumental records of fluctuations in the soil stratum. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 59–75. DOI: 10.46698/VNC.2023.17.83.005. (In Russ.)
13. Gasparini D.A., Vanmarcke E.H. Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra. MIT Research Report R76-4. 1976.
14. Huang D., Wang G. Energy-compatible and spectrum-compatible (ECSC) ground motion simulation using wavelet packets. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2017. Vol. 46. Issue 11. pp. 1855–1873. DOI: 10.1002/eqe.2887.
15. Krawinkler H., Seneviratna G.D.P.K. Pros and cons of a modal pushover analysis of seismic performance evaluation. Engineering Structures. 1998. Vol. 20. Issue 4–6. pp. 452–464. DOI: 10.1016/S0141-0296(97)00092-8.
16. Li X., Wang Y., Zhao B. Spectrum-compatible accelerogram generation using an improved wavelet-based method. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2021. Vol. 141. Art. No. 106506. DOI: 10.1016/j.soildyn.2020.106506.
17. Priestley M.J.N., Calvi G.M., Kowalsky M.J. Displacement-Based Seismic Design of Structures. Pavia. IUSS Press. 2007. 670 p.
18. Rezaeian S., Der Kiureghian A. Stochastic Modeling and Simulation of Ground Motions for Performance-Based Earthquake Engineering (PEER Report 2010/02). Berkeley, CA. UC Berkeley. 2010. 22 p.
19. Richart F.E., Hall J.R., Woods R.D. Vibration of Soils and Foundations. Englewood Cliffs, NJ. Prentice-Hall. 1970. 414 p.
20. Saragoni G.R., Hart G.C. Simulation of artificial earthquakes. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 1974. Vol. 2. Issue 3. pp. 249–267. DOI: 10.1002/eqe.4290020305.
21. Vanmarcke E. Probabilistic modeling of response spectra. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE. 1979. Vol. 105(EM3). pp. 425–446.
22. Woods R.D., Jedgele L.P. Energy-attenuation relationships from construction vibrations. In: Vibration Problems in Geotechnical Engineering. Eds. G. Gazetas, E.T. Selig. ASCE STP. New York. 1985. pp. 187–202.
23. Zaalishvili V.B., Kambolov D.A., Melkov D.A., Fidarova M.I. Statistical characteristics calculation of seismic intensity increments for the purpose of seismic microzoning in mountain territories. Sustainable Development of Mountain Territories. 2024. Vol. 16. No. 1. pp. 345–357. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-345-357. (In Russ.)
24. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I. Correlation between the value of macroseismic intensity and the indicators of instrumental records of the Gouban earthquake of 2000 and the Tbilisi earthquake of 2002. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 89–108. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.23.007. (In Russ.)

DOI: 10.46698/VNC.2025.64.62.001

Original paper

On the seismicity of the Karabakh and East Zangezur territories of Azerbaijan

T.Ya. Mammadli 

National Academy of Sciences of Azerbaijan, Republican Seismic Survey Center, Azerbaijan,
25 N. Rafibeyli Str., Baku AZ1001, e-mail: m-tahir@mail.ru

Received: 02.07.2025, revised: 01.09.2025, accepted: 03.09.2025

Abstract: Relevance. This paper examines the seismic and tectonic characteristics of Azerbaijan, with emphasis on the Karabakh and Eastern Zangezur regions. The study is relevant because the absence of seismic stations in these areas has led to a prolonged lack of systematic observations. **Aim.** The main objective is to analyze the seismicity of the Karabakh and Eastern Zangezur zones in greater detail and to identify their specific features. **Methods.** The research considers the spatial and temporal distribution of earthquakes and their relationship with regional tectonics. Azerbaijan is a seismically active territory where both strong and moderate earthquakes have occurred. The epicenters of major events are concentrated mainly along the southern slope of the Greater Caucasus. In the Lesser Caucasus, large earthquakes are less frequent but have been recorded in Ganja, Kalbajar, and Agdam, as well as in the Lerik and Masalli districts. In the Kura depression, earthquake foci are observed but less densely distributed. A significant clustering of strong earthquake epicenters is also noted in the Caspian Sea – 60–70 km north, 100–120 km east, and about 50 km south of the Absheron Peninsula. Weak tremors are unevenly distributed, mainly in the eastern Greater Caucasus, often coinciding with strong earthquake zones. **Results.** Unlike many seismically active regions of Azerbaijan, the Karabakh and Eastern Zangezur zones (except the Kalbajar district and its eastern part) are considered aseismic, owing to the absence of active faults. However, seismic hazard may still arise from neighboring, more active regions.

Keywords: earthquakes, seismicity, epicenter map, tectonics, aseismicity, earthquake source, faults.

Acknowledgment: *This work was supported by the Azerbaijan Science Foundation-Grant No. AEF-MGC-2024-2(50)-16/05/2-M-05.*

For citation: Mammadli T.Ya. On the seismicity of the Karabakh and East Zangezur territories of Azerbaijan. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 128-135. DOI: 10.46698/VNC.2025.64.62.001

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2025.64.62.001

Оригинальная статья

О сейсмичности Карабахской и Восточно-Зенгезурской областей территории Азербайджана

Т.Я. Маммадли

Национальная Академия Наук Азербайджана, Республиканский Центр
Сейсмологической Службы, Республика Азербайджан, AZ1001,
г. Баку, ул. Н. Рафибейли 25, e-mail: m-tahir@mail.ru

Статья поступила: 02.07.2025, доработана: 01.09.2025, принята к публикации: 03.09.2025

Резюме: Актуальность работы. В данной работе рассматриваются сейсмические и тектонические особенности Азербайджана, с акцентом на Карабахский и Восточно-Зангезурский регионы. Актуальность определяется отсутствием сейсмических станций в этих районах, что привело к длительному отсутствию систематических наблюдений. **Цель исследования.** Основная цель заключается в более детальном анализе сейсмичности Карабахской и Восточно-Зангезурской зон и выявлении их специфических особенностей. **Методы.** В работе рассматриваются пространственно-временные особенности распределения землетрясений и их связь с региональной тектоникой. Азербайджан является сейсмически активной территорией, где происходили как сильные, так и умеренные землетрясения. Эпицентры крупных событий сосредоточены главным образом на южном склоне Большого Кавказа. В пределах Малого Кавказа сильные землетрясения наблюдаются реже, однако они зафиксированы в районах Гянджа, Кельбаджар и Агдам, а также в Лерикском и Масаллинском районах. В Кюрской впадине очаги землетрясений встречаются, но распределены менее плотно. Значительное скопление эпицентров сильных землетрясений отмечается и в Каспийском море – в 60–70 км к северу, 100–120 км к востоку и около 50 км к югу от Апшеронского полуострова. Слабые толчки распределены крайне неравномерно, преимущественно в восточной части Большого Кавказа, и чаще всего совпадают с зонами сильных землетрясений. **Результаты.** В отличие от многих других сейсмоактивных регионов Азербайджана, Карабахская и Восточно-Зангезурская зоны (за исключением Кельбаджарского района и его восточной части) считаются асейсмичными, что объясняется отсутствием активных разломов. Тем не менее, сейсмическая угроза для этих регионов может исходить от соседних, более активных зон.

Ключевые слова: землетрясения, сейсмичность, карта эпицентров, тектоника, асейсмичность, очаг землетрясения, разломы.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Азербайджанского научного фонда в рамках проекта № AEF-MGC-2024-2(50)-16/05/2-M-05.

Для цитирования: Маммадли Т.Я. О сейсмичности Карабахской и Восточно-Зангезурской областей территории Азербайджана. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3):128-135. DOI: 10.46698/VNC.2025.64.62.001

Introduction

In the Karabakh and East Zangezur regions of Azerbaijan, seismic research has not been conducted for about 30 years. It is worth noting that these studies were not widely developed even during the Soviet era. Seismic stations in this region were opened in the mid-1980s in the Jebail, Kalbacar, and Aghdam districts. Thus, the seismicity of this area

has not been investigated. Currently, the region is undergoing reconstruction. Large cities, roads, bridges, tunnels, airports and other civil and industrial facilities are being built. All this makes the study of the seismicity of this territory relevant, which is necessary for assessing the seismic hazard and risk.

Seismicity manifestations in the territory of Azerbaijan

The territory of Azerbaijan is characterized by fairly high seismic activity. Strong earthquakes have repeatedly occurred here, examples of which are the earthquakes of Gandja ($M \gg 6.7$, $I_0 \gg 9$ points) in 427, ($M \gg 6.8$, $I_0 \gg 9$ points) in 1139 and Shamakhi ($M \gg 7.0$, $I_0 \gg 9-10$ points) in 1667, ($M \gg 6.9$, $I_0 \gg 9-10$ points) in 1902. During the Gandja earthquake of 1139, the largest lake in Azerbaijan, Goygol, was formed. The earthquake that occurred in Shamakhi in 1667 ($M \gg 7.0$, $I_0 \gg 9-10$ points) is considered the strongest earthquake in the Caucasus. Data from that time indicate that rock avalanches during this earthquake claimed the lives of more than 80,000 people [New Catalogue, 1977]. This earthquake was followed by strong aftershocks over the next few years, with an Intensity of 8 on the MSK-64 scale at the epicenter.

In addition to strong ones, numerous weak ($M < 4.0$) and moderate ($M = 4.0 \div 5.5$) earthquakes occur annually in Azerbaijan. Moderate earthquakes usually caused cracks in houses and rarely resulted in destruction. Such earthquakes include Ismayilli ($M = 5.1$) of 1981, Aghdash ($M = 4.9$) of 1999, Caspian (Baku) ($M = 6.2$) of 2000, Zagatala ($M = 5.6$) of 2012, Shamakhi-Ismayilli-Akhsu ($M = 5.1$) of 2019. Maps of the earthquake epicenters of different magnitudes allow us to judge the features of seismicity in the territory of Azerbaijan.

The map of strong earthquake epicenters (with $M \geq 5.0$) in Azerbaijan for the period 427-2024, constructed using the earthquake catalogue (fund of the Seismic Survey Center of ANAS), shows that strong earthquakes occurred rarely and not everywhere (fig. 1). The epicenters of strong earthquakes are mainly concentrated in certain areas of the southern slope of the Greater Caucasus, which are separated by less active or aseismic zones. Moreover, the densest cluster is characteristic for the Shamakhi-Ismayilli region. High seismic activity is also observed in the northeast of the Republic (in Guba, Gusar and Khachmaz regions).

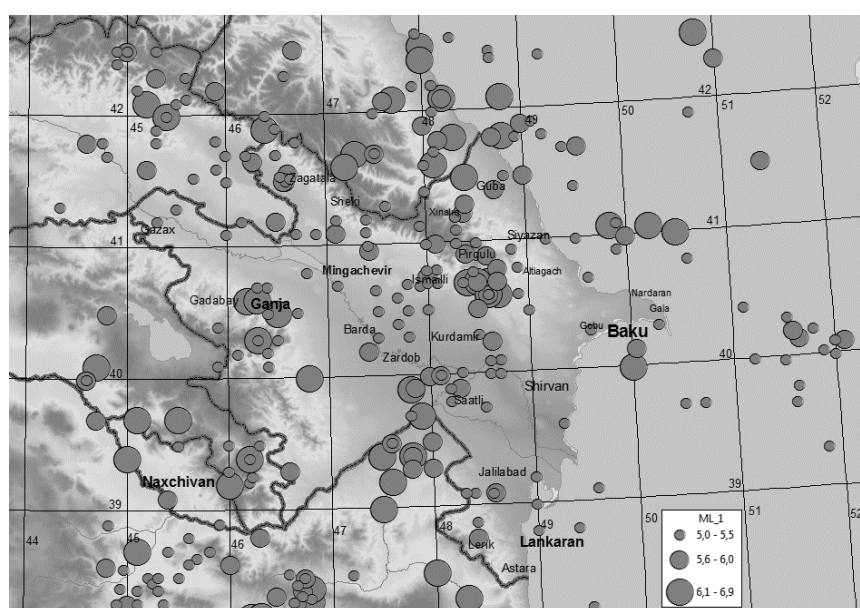


Fig. 1. Map of earthquake epicenters with $M \geq 5.0$ in the territory of Azerbaijan for the period 427-2024

To the south of the eastern part of the Greater Caucasus – within the Kura Depression, there are sources of strong earthquakes, although they are not distributed so densely.

In the Azerbaijani part of the Lesser Caucasus, rare strong earthquakes are observed in Gandja, Kalbajar and Aghdam, as well as in Lerik and Masalli regions.

The epicenters of strong earthquakes are concentrated in the Caspian Sea – approximately 60-70 km north, 100-120 km east and 50 km south of the Absheron Peninsula.

The analysis shows that within Azerbaijan, weak seismic tremors are also distributed extremely unevenly (fig. 2). The overwhelming majority of earthquakes occur in the eastern part of the Greater Caucasus. It should be noted that this region is characterized by such an uneven distribution. There is a concentration of earthquake epicenters in some places and a small number of them or their absence in others.

Here, an increased concentration of epicenters is noted in the zones of occurrence of strong earthquakes – in the area between the cities of Balakan and Zagatala, in the Oghuz region, to the east of the Gabala meridian, as well as in the Ismailly and Shamakhi regions. These zones of accumulation of seismic tremors are separated by areas characterized by a small number of earthquakes, or their complete absence.

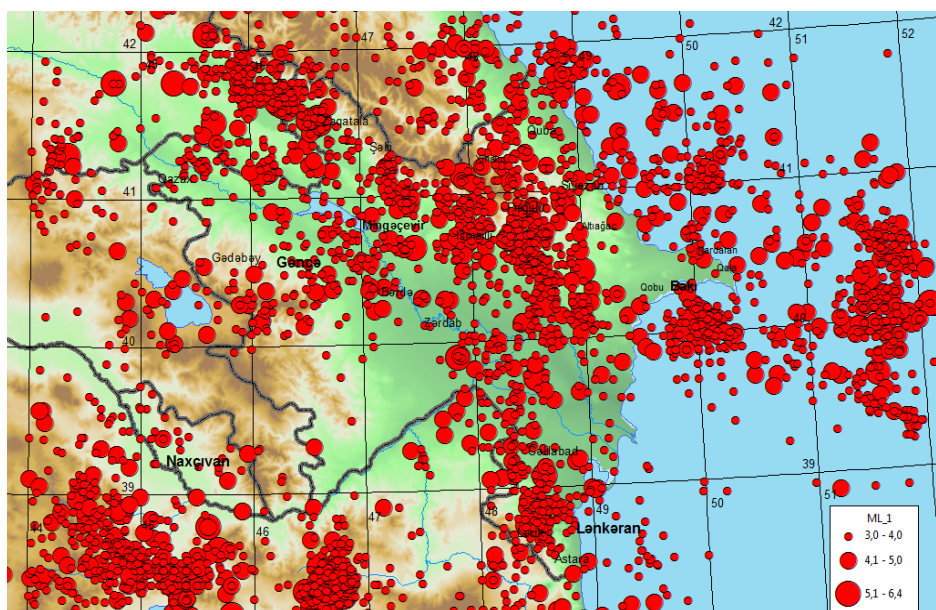


Fig. 2. Map of earthquake epicenters with $M \geq 3.0$ in the territory of Azerbaijan for the period 1980-2024

An increased level of weak seismicity is also characteristic of all source zones in the Kura Depression (Aghdash, Kurdamir, Zardab, Imishli districts), the Azerbaijani part of the Lesser Caucasus (Gandja and Kalbajar districts). A high concentration of weak earthquake sources is characteristic of the Lerik and Masalli districts.

In addition to the above seismically active areas, there are also separate aseismic zones in Azerbaijan.

These zones include the Absheron Peninsula with its western part (up to the meridian of 49° E), a small zone north of the Gadabay region (the zone between $40,5^\circ$ and 41° N and from the border with Armenia to 46° E), and a fairly large territory covering the areas of the Karabakh and East Zangezur regions. Within these zones, isolated epicenters of seismic tremors are observed or they are absent altogether. Thus, the territory of Azerbaijan can be considered a unique seismological laboratory, where nature conducts various

experiments: in one case, the depression zone (east of the meridian of 49° E, including the Absheron Peninsula, as well as the flat part of Karabakh) is aseismic, i.e. isolated epicenters of seismic tremors are observed, in another case the same zone (Kura Depression) is characterized by high seismicity. On the other hand, one mountain-fold system (the eastern part of the Greater Caucasus) is characterized by increased seismicity, and at the same time another mountain-fold system – in East Zangezur – does not have seismic tremors. All this shows that the zones of occurrence of earthquakes are not connected in any way by the geomorphological conditions of the area.

Tectonic substantiation of seismicity of the territory of Azerbaijan

Scientists have long established that strong and destructive earthquakes are confined to fault zones [Caputo et al., 1980; Gamburtsev, 1955; Gelfand et al., 1972]. It should be noted that weak and medium-strength earthquakes also occur in fault zones. The fact is that an indispensable condition for the occurrence of strong earthquakes is contrasting tectonic movements, which are characteristic of fault zones dividing areas with different, and sometimes sharply changing, directions of tectonic movements. And areas within geological structures are characterized by a common tectonic regime (without contrasting movements) and, therefore, there are no conditions for the occurrence of strong earthquakes.

As noted, researchers believe that strong and destructive earthquakes are associated with fault zones observed at the surface or inferred at depth [Gamburtsev, 1955; Gubin, 1978; Gubin, 1950; Rantsman, 1979; Riznichenko, 1976].

However, there are alternative views regarding seismogenic zones. Some scholars argue that the foci of major earthquakes are localized at morphostructural nodes, i.e., at the intersections of active faults [Caputo et al., 1980; Gelfand et al., 1972]. The locations of such nodes are determined using the method of morphostructural zoning [Alekseevskaya et al., 1977; Gelfand et al., 1972; Gorshkov, 2010; Polyakova, 1985; Shikhalibeyli, 1996]. It has been demonstrated in that the assumption concerning the localization of strong earthquake foci at the intersections of active faults is supported by statistical analysis.

On the territory of the Greater Caucasus, a number of structural elements are distinguished, with a general Caucasian direction, which plunge in the eastern direction.

The Kura Trough has a complex structure. Within its boundaries, marginal and internal zones with geosynclinal and platform foundations of the Meso-Paleogene, respectively, are distinguished. Karabakh and East Zangezur regions of Azerbaijan are located within the Lesser Caucasus, which is a folded-block mountain belt. The main tectonic structures are the Zangezur folded-block massif, which includes raised blocks of crystalline rocks, the Karabakh Highland – a volcano-plutonic structure composed of Jurassic and Cretaceous volcanogenic-sedimentary formations, and the Megan synclinorium – a large geological structure containing a thick layer of sedimentary rocks of the Jurassic and Cretaceous age.

Large structures in the territory of Azerbaijan during the entire Alpine cycle or its individual stages were limited by deep faults and experienced intensive differential movements, predetermining the modern structure of the region.

Deep faults in the territory of Azerbaijan were studied by E.Sh. Shikhalibeyli, F.S.Akhmedbeyli and other researchers [Akhmedbeyli, 2004; Shikhalibeyli, 1996]. Along with faults with a general Caucasian direction, they also distinguish transverse (anti-Caucasian) faults.

However, it was established [Mammadli, 2011, 2012, 2014, 2022; Mammadli, Muradov, 2023; Mammadli, Rogozhin, 2019; Ovsyuchenko et al., 2011; Yetirmishli, Kazimov, 2022] that tectonic faults are not active along their entire length and, accordingly, strong earthquakes may not occur at all their points. A method was developed for determining active segments of deep faults based on weak seismicity, which allows more accurately establishing the spatial positions of real source zones of strong earthquakes [Gubin, 1978]. Using this method, many active segments of deep faults (source zones) with different lengths and directions were established in the territory of Azerbaijan (fig. 3).

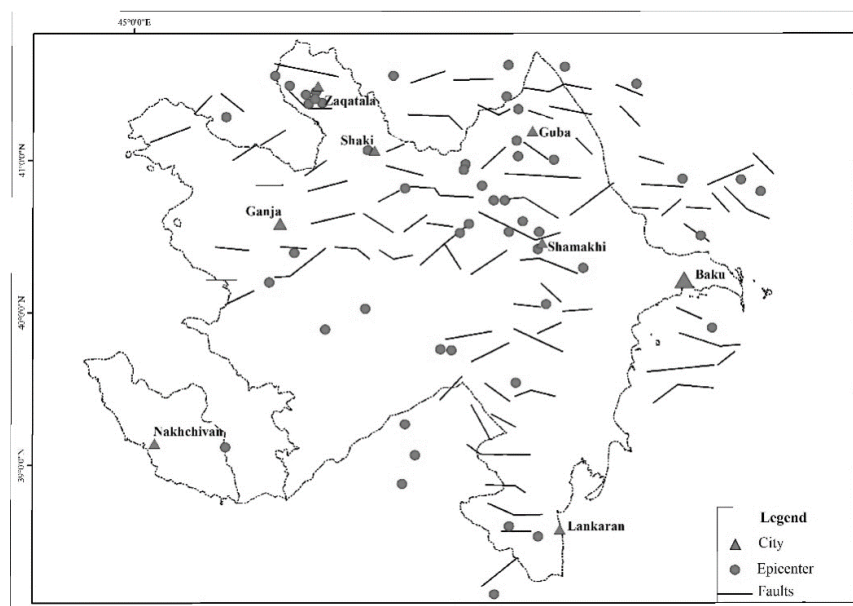


Fig. 3. Schematic map of active segments of deep faults (source zones) of strong earthquake zones in Azerbaijan

This schematic map shows that these sources of strong earthquakes correspond to individual segments of faults. In other words, active segments of deep faults are the generators of earthquakes. In zones where there are no active deep faults, there are isolated epicenters of seismic tremors.

Discussion of Results

The results of our research allow us to conclude that some areas of the territory of Azerbaijan, including Karabakh and East Zangezur regions, are characterized by aseismicity, i.e. in these areas there are no tectonic conditions for the occurrence of earthquakes. The seismic threat to these zones comes from the sources of strong earthquakes in neighbouring regions and, given their potential strength, the seismic hazard of the territory of the Karabakh and East Zangezur regions (except for the Kalbajar region and its eastern part) is estimated at 7 points on the MSK-64 scale [Mammadli, 2022] (fig. 4). The same seismic hazard is characteristic of small zones to the north of the Gadabay region (the zone between 40,5° and 41° N and from the border with Armenia to 46° E), to the south of the city of Gakh, to the north of the city of Sumgait, between the cities of Shirvan and Neftchala.

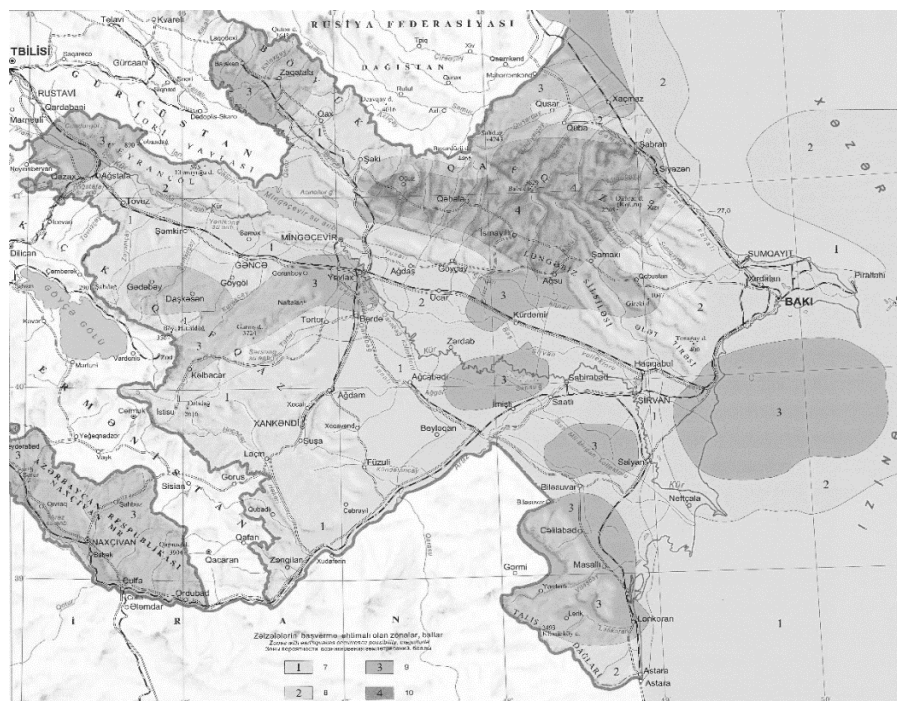


Fig. 4. Map of the probability of the strong earthquake's occurrence within the territory of the Republic of Azerbaijan (Mammadli, Yetirmishli, 2013)

It should be noted that, unlike other zones with a low level of seismic hazard, the Karabakh and East Zangezur regions occupy a fairly large territory. Currently, large-scale construction works are being carried out in these territories. Cities, roads, bridges, tunnels, airports and many other civil and industrial facilities are being built. Territories with a low level of seismic hazard are the most favourable for such major construction work. Detailed seismotectonic studies and anti-seismic calculations are not required.

Conclusion

The conducted studies allow us to conclude the following:

1. The seismicity of the territory of Azerbaijan is characterized by extreme heterogeneity.
2. Along with areas of increased seismicity, there are aseismic zones where isolated epicenters of seismic tremors are observed.
3. The aseismicity of some areas of the territory of Azerbaijan, including the Karabakh and East Zangezur zones (with the exception of Kalbajar region and its eastern part) is due to the fact that there are no tectonic conditions for the occurrence of earthquakes within them.
4. The territory of Karabakh and East Zangezur (with the exception of Kalbajar region and its eastern part) with a low level of seismic hazard are the most favourable for many civil and industrial construction works.

References

1. Akhmedbeyli F.S. Neotectonics and some aspects of late-orogenic geodynamics of Azerbaijan. Baku. Nafta-Press. 2004. 270 p.
2. Alekseevskaya M.A., Gabrielov. A.M., Gvishiani. A.D., Gelfand. I.M., Rantsman. E.Ya. Morphostructural zoning of mountain regions by formalized criteria. In: Pattern Recognition and Spectral Analysis in Seismology. Ed. V.I. Keilis-Borok. Moscow. Nauka. 1977. pp. 33–49. (In Russ.)

3. Caputo M., Keilis-Borok V., Oficerova E., Ranzman E., Rotwain I., Solovjeff A. Pattern recognition of earthquake-prone areas in Italy. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1980. Vol. 21. pp. 305–320.
4. Gamburtsev G.A. Status and prospects of research in the field of earthquake prediction. *Bulletin of the Council on Seismology Academy of Sciences of the USSR*. 1955. No. 1. pp. 7–14. (In Russ.)
5. Gelfand I.M., Guberman Sh., Izvekova M.L., Keilis-Borok V.I., Ranzman E.Ia. Criteria of high seismicity determined by pattern recognition. *Tectonophysics*. 1972. Vol. 13. No. 1–4. pp. 415–422.
6. Gelfand I.M., Guberman Sh.A., Izvekova M.L., Keilis-Borok V.I. On criteria of high seismicity. *Doklady Earth sciences USSR*. 1972. Vol. 202. No. 6. pp. 1317–1320. (In Russ.)
7. Gorshkov A.I. Recognition of areas prone earthquakes in the Alpine-Himalayan belt. *Series: Computational Seismology*. Issue 40. Moscow. Nauka. 2010. 472 p. (In Russ.)
8. Gubin I.E. Geology and earthquakes. In: *Seismotectonics of the Southern Regions of the USSR*. Ed. I.E. Gubin. Moscow. Nauka. 1978. pp. 5–26. (In Russ.)
9. Gubin I.E. The seismotectonic method of seismic zoning. In: *Proc. of the Geological Institute, Academy of Sciences of the USSR*. Vol. 140. Issue 13. Moscow. Nauka. 1950. pp. 1–53. (In Russ.)
10. Mammadli T.Y. Deep structural features of focal zones in the territory of Azerbaijan. In: *Proc. Dang. nat. and antropog. geological processes in mountainous and foothill territories of the Northern Caucasus*. Vladikavkaz. CGI VSC RAS and RNO–A. 2012. pp. 321–328. (In Russ.)
11. Mammadli T.Y. Determination of seismogenic zones for analysis of seismotectonic activity of deep faults: Seismic hazard assessment for the territory of Azerbaijan. *Geotectonics*. 2022. Vol. 56. No. 2. pp. 191–199. (In Russ.)
12. Mammadli T.Y. Methodology for identifying focal zones of strong earthquakes based on weak seismicity. In: *Proc. of the IV Caucasian International School-Seminar for Young Scientists Seismic Hazard and Seismic Risk Management in the Caucasus*. Vladikavkaz. CGI VSC RAS and RNO-A. 2011. pp. 27–32. (In Russ.)
13. Mammadli T.Y. On the seismic hazard of the territory of Azerbaijan. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2014. No. 3. pp. 116–120. (In Russ.)
14. Mammadli T.Y., Rogozhin E.A. Transverse faults of the Eastern Caucasus and their manifestations in seismicity. *Seismic Instruments*. 2019. Vol. 55. No. 2. pp. 220–228.
15. Mammadli T.Ya., Muradov R.B. Tectonics of source zones of strong earthquakes in the south-eastern part of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 63–72. DOI: 10.46698/VNC.2023.99.42.005. (In Russ.)
16. New Catalogue of Strong Earthquakes in the Territory of the USSR. Eds. N.V. Kondorskaya, N.V. Shebalin. Moscow. Nauka. 1977. 535 p. (In Russ.)
17. Ovsyuchenko A.N., Novikov S.S., Larkov A.S., Marakhanov A.V. Features of seismotectonics and ancient earthquakes of South Ossetia (Part 1). *Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center*. 2011. Vol. 12. No. 3. pp. 55–68. (In Russ.)
18. Polyakova T.P. Seismicity of the central part of the Mediterranean belt. Moscow. Nauka. 1985. 160 p. (In Russ.)
19. Rantsman E.A. Earthquake locations and morphostructure of mountain regions. Moscow. Nauka. 1979. 170 p. (In Russ.)
20. Riznichenko Yu.V. Dimensions of the crustal earthquake source and seismic moment. In: *Studies in the Physics of Earthquakes*. Moscow. Nauka. 1976. pp. 9–27. (In Russ.)
21. Shikhalibeyli E.Sh. Some problematic issues of the geological structure and tectonics of Azerbaijan. Baku. Elm. 1996. 215 p.
22. Yetirmishli G.J., Kazimov I.E. Modern GPS geodynamics of Azerbaijan. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 19–30. DOI: 10.46698/VNC.2022.35.95.002. (In Russ.)

УДК: 550.8

DOI: 10.46698/VNC.2025.47.90.002

Оригинальная статья

Локализация золотоносных минерализаций по космическим снимкам

Д.Б. Давыденко¹, С.Г. Парада²

¹ Южный научный центр Российской академии наук,
Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41,
e-mail: maurmar@yandex.ru;

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

Статья поступила: 04.08.2025, доработана: 15.09.2025, принята к публикации: 18.09.2025

Резюме: Актуальность определяется необходимостью разработки технологий поиска и оценки слепых и погребенных рудных тел на основе спектрозональных космических снимков. **Цель.** Разработать основы технологии локализации золотоносных минерализаций по спектрозональным характеристикам космических снимков. **Методы.** Математические процедуры, позволяющие исключить ландшафтные помехи и адаптировать алгоритм обработки информации к изменению свойств аномалий и «помех», осуществлять анализ и оценку свойств аномалий в процессе самой обработки. **Результаты.** Разработаны основы оригинальной технологии выявления аномального эффекта над рудными телами по космическим снимкам и локализации золотоносных минерализаций на примере месторождения Радужное (Кабардино-Балкарская республика). При этом получение спектрозональных характеристик космических снимков рассматривается как своеобразный геофизический метод исследования земных недр. Обращено внимание на то, что такие снимки фиксируют электромагнитные колебания в интервалах отражённого и излучённого частей спектра. Это определяет возможность использования тех методов, которые были разработаны для выделения геофизических аномалий на фоне помех. Основой технологии является подбор таких математических преобразований изображений земной поверхности, которые бы обеспечили надёжное гашение ландшафтных помех и усиление аномального эффекта, обусловленного эндогенными рудообразующими процессами. Для описания особенностей отражательной способности ландшафтов, в качестве исходных параметров создан массив данных, состоящий из 29 признаков, включающих различные характеристики рельефа, освещённости, а также различия изображений для периодов весна–лето и лето–осень. В результате факторного анализа из 29 признаков получено 15 факторов. Для кластеризации были отобраны наиболее значимые факторы путем последовательного визуального анализа графа и таблицы, отображающих их связи с конкретными природными объектами. Ключом для определения природы фактора являлся высокий вес признака. В результате отобрано 11 факторов, которые обусловлены эндогенными, в т.ч. рудообразующими процессами. На их основе осуществлен кластерный анализ, по результатам которого получено 83 типа элементарных площадок. Два из них совпали с проекцией Первой рудной залежи на дневную поверхность. Площади распространения этих двух типов за пределами эталонной рудной залежи предлагается рассматривать в качестве признака наличия в недрах новых золоторудных объектов.

Ключевые слова: поиски полезных ископаемых, золото, спектрозональные космические снимки, факторный анализ, кластерный анализ, месторождение Радужное.

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

Для цитирования: Давыденко Д.Б., Парада С.Г. Локализация золотоносных минерализаций по космическим снимкам. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 136–147. DOI: 10.46698/VNC.2025.47.90.002

DOI: 10.46698/VNC.2025.47.90.002

Original paper

Localization of gold-bearing mineralizations from satellite images

D.B. Davydenko¹, S.G. Parada²

¹ South Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
41 Chekhov Ave., Rostov-on-Don 344006, Russian Federation,
e-mail: maurmar@yandex.ru;

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

Received: 04.08.2025, revised: 15.09.2025, accepted: 18.09.2025

Abstract: The relevance is determined by the need to develop technologies for searching and evaluating blind and buried ore bodies based on spectral satellite images. **Aim.** To develop the basics of technology for localization of gold-bearing mineralizations based on the spectral characteristics of satellite images. **Methods.** Mathematical procedures that make it possible to eliminate landscape interference and adapt the information processing algorithm to changes in the properties of anomalies and “interference”, to analyze and evaluate the properties of anomalies during the processing itself. **Results.** The basics of an original technology for detecting anomalous effects on ore bodies from satellite images and localization of gold-bearing mineralizations have been developed using the example of the Raduzhnoye deposit (Kabardino-Balkarian Republic). At the same time, obtaining the spectral characteristics of satellite images is considered as a kind of geophysical method for studying the Earth’s interior. Attention is drawn to the fact that such images capture electromagnetic vibrations in the ranges of the reflected and radiated parts of the spectrum. This determines the possibility of using those methods that have been developed to identify geophysical anomalies against the background of interference. The basis of the technology is the selection of such mathematical transformations of images of the Earth’s surface that would ensure reliable attenuation of landscape interference and amplification of the anomalous effect caused by endogenous ore-forming processes. To describe the features of the reflectivity of landscapes, a data array consisting of 29 features was created as initial parameters, including various characteristics of relief, illumination, as well as image differences for the spring-summer and summer-autumn periods. As a result of factor analysis, 15 factors out of 29 signs were obtained. For clustering, the most significant factors were selected by sequential visual analysis of a graph and a table showing their relationship to specific natural objects. The key to determining the nature of the factor was the high weight of the trait. As a result, 11 factors were selected, which are caused by endogenous, including ore-forming processes. Based on them, a cluster analysis was carried out, which resulted in 83 types of elementary sites. Two of them coincided with the projection of the First ore deposit onto the day surface. The distribution areas of these two types outside the reference ore deposit are proposed to be considered as a sign of the presence of new gold mining facilities in the subsurface.

Keywords: mineral prospecting, gold, spectral satellite images, factor analysis, cluster analysis, Raduzhnoye deposit.

Acknowledgements: The work was performed as part of the implementation of the state assignment of the UNC RAS, state registration number 125011700412-6 and GPI VNC RAS.

For citation: Davydenko D.B., Parada S.G. Localization of gold-bearing mineralizations from satellite images. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 136-147. DOI: 10.46698/VNC.2025.47.90.002

Введение

В настоящее время, когда практически все месторождения, которые легко обнаружить с поверхности стандартными методами, уже выявлены, а основной целью прогноза и поисков становятся слепые и погребенные месторождения, особо актуальным является использование космических и геоинформационных технологий в совокупности с современными представлениями о строении и трансформациях земной коры [Дэвис, 1990; Матишов и др., 2010; Давыденко, 2016 и др.]. К таким методам относится фиксация признаков наличия в недрах полезных ископаемых по спутниковым данным. Используется явление отображения в ландшафтах земной поверхности эндогенных рудообразующих процессов. Последние, с одной стороны определяют появление в недрах скоплений минерального сырья, с другой стороны прямо или косвенно влияют на формирование экзогенных ландшафтов. Эти ландшафтные особенности отражаются, прежде всего, в растительном покрове и зависят в конечном итоге от состава флюидной фазы почвенного слоя, что и находит отражение на спектрально-космических снимках [Аэрокосмические методы ..., 2000; Трифонов, 2010; Горный, Тронин, 2012 и др.]. Таким образом, при изучении космоснимков рудные объекты могут быть выявлены по своеобразному изменению отражательной способности ландшафта над ними. Эта особенность надрудных ландшафтов отображается в своеобразии спектрального изображения данного участка на многозональных космических снимках, что используется в большинстве исследований [Wang et al., 2022 и др.].

К настоящему времени имеется опыт прогноза по спутниковым данным в отношении залежей углеводородов [Архипов и др., 2011; Бусыгин и др., 2012], кимберлитового магматизма [Серокуров, 2013], месторождений вольфрама [Liu et al., 2025], золоторудных проявлений [Zhang, 2007; Бусыгин, Никулин, 2009; Абушкевич, Волин, 2014; Давыденко, 2016; Milovsky et al., 2024 и др.].

Именно изменения в ландшафтах, вызванные, как предполагается наличием полезного ископаемого в недрах, отражающиеся на спектрально-космических снимках фиксируются при прогнозировании полезных ископаемых. Мы же считаем, что для решения задач геологического дешифрирования космических снимков рисунок ландшафта является в большом числе случаев помехой (особенно это характерно для техногенных ландшафтов, преобладающих на юге России, а также горных территорий). При этом спектрально-космические снимки рассматриваем не только как способ получения изображения ландшафтов, но и как своеобразный геофизический метод исследования земных недр. Такие снимки фиксируют электромагнитные колебания в интервалах отражённого и излучённого частей спектра. Это определяет возможность привлечения для прогноза и поиска полезных ископаемых на базе многозональных космических съёмок тех методов, которые были разработаны для выделения геофизических аномалий на фоне помех.

В связи с изложенным нами на примере Радужного золоторудного месторождения (Кабардино-Балкарская республика) опробована предлагаемая ниже технология выявления аномальных эффектов, обусловленных наличием полезного ископаемого в недрах.

Материал и методы

В качестве анализируемых материалов в настоящем исследовании использованы цифровые снимки, полученные с космического аппарата Ландсат-7 (Landsat-7). Комплект этих снимков для одного и того же участка местности (сцена) включает в себя изображения, полученные в семи различных спектральных диапазонах (табл. 1). Первые три зоны являются результатом подразделения видимой части электромагнитного спектра, а четыре остальных относятся к невидимой (тепловой) части. При этом изображения в шести первых зонах связаны с отражением солнечного излучения, а в дальней тепловой зоне находит отображение также и излучение недр Земли.

Таблица 1 / Table 1

**Параметры сцены космической съемки спутника Landsat-7 ETM+ /
Parameters of the space survey scene of the Landsat-7 ETM**

Спектральные зоны/ Spectral zones		Диапазоны спектральных каналов, мкм/ Spectral channel ranges, mcm	Пространственное разрешение, м/ Spatial resolution, m
Видимые/ Visible	голубая/ blue	0,45–0,52	30
	зеленая/ green	0,52–0,6	30
	красная/ red	0,63–0,69	30
Ближняя инфракрасная/ Near infrared		0,76–0,9	30
Средняя инфракрасная/ Medium infrared		1,55–1,75	30
		2,08–2,35	30
Дальняя Инфракрасная/ Far infrared		10,42–12,5	60
Панхроматическая/ Panchromatic		0,52–0,9	15

Аномалии фототона, обусловленные глубинными факторами и как бы наложенные на фотохарактеристики ландшафта, рассматриваются в качестве полезной информации. Одной из главных задач прогнозирования по космическим снимкам является подбор таких математических преобразований изображений земной поверхности, которые бы обеспечили надёжное гашение ландшафтных помех и усиление аномального эффекта над рудными телами. С этой целью можно применять оценку динамики ландшафта по временным рядам с использованием ежегодных спутниковых снимков и пространственного статистического моделирования, например [Fan et al., 2017], обнаружение изменений во временных рядах спутниковых изображений с помощью спектрального анализа, например [Ghaderpour, Vujadinovic, 2020] и множество других процедур. В основу используемой нами технологии заложены математические процедуры, которые позволяют погасить ландшафтные помехи и адаптировать алгоритм обработки информации к изменению свойств аномалий и «помех» и осуществлять анализ и оценку свойств аномалий в процессе самой обработки.

Саму технологию обработки можно подразделить на три основных этапа.

Предварительный этап включает в основном коррекцию площадной привязки снимков, существенное снижение влияния такой яркой помехи как различие в изображении участков освещенных солнцем и находящихся в тени (гашение помехи

«свет-тень»), а также факторный анализ. При этом формируется понятийная модель, подготавливается массив исходных данных, создается числовой массив признаков, описывающих с регулярным шагом всю исследуемую площадь, осуществляется факторный анализ и выбор наиболее информативных факторов.

Для равнинных регионов космоснимки достаточно надежно привязаны к системе координат и не требуют дополнительной коррекции. Однако на снимках горных районов плановое положение гидросети существенно различается в сравнении с данными топографических карт. Поэтому необходима коррекция, которая должна обеспечить точное соответствие друг другу всех снимков в разных спектральных зонах. Такая коррекция осуществлялась нами с помощью программных комплексов ГИС ИНТЕГРО и ArcGis.

Особенности геологического пространства, связанные с эндогенными, в т.ч. рудообразующими процессами, влияют на газово-геохимическую среду почвенного слоя, обуславливая различную яркость окраски растительности. Однако экзогенные факторы в еще большей степени изменяют отражательную способность территории, маскируя влияние эндогенных процессов. В условиях высокогорных районов со значительной расчлененностью рельефа наблюдаются резкие изменения локальных ландшафтов, что также обусловлено экзогенными факторами. Поэтому требуется определиться через понятийную модель с составом двух групп компонент (экзогенных и эндогенных), определяющих отражательную способность ландшафтов и по возможности отбраковать как можно больше экзогенных факторов.

В условиях горного резко расчлененного рельефа различия участков освещенных и затененных очень существенны. Поэтому гашение этой помехи («свет-тень») важно для последующих преобразований. Снижающим влияние этой помехи в изображении ландшафта, является нормирование признаков освещенностью. При этом уменьшается дисперсия признаков (табл. 2), а также корреляция признаков с освещенностью. Таким образом, происходит гашение помехи. В других случаях для решения подобной задачи использовано нахождение медианных значений в пределах скользящей самоадаптирующейся (по размерам и форме) площадки.

Таблица 2 / Table 2

**Значения дисперсии признаков до и после нормирования освещенностью/
Values of the variance of features before and after normalization by illumination**

Спектральный диапазон/ Spectral range	Дисперсия признака/ Feature variance	
	до нормирования освещенностью/ before light rationing	после нормирования освещенностью/ after rationing by luminosity
0.45–0.52 (синий–голубой)/(blue–blue)	1.00051	0.05682
0.52–0.6 (зеленый–желтый)/(green–yellow)	0.99957	0.0555
0.63–0.69 (красный)/(red)	1.00001	0.0571
0.76–0.9 (ближний ИК)/(near infrared)	0.99983	0.05997
1.55–1.75 (коротковолновый средний ИК)/ (shortwave medium IR)	1.00018	0.05643
10.42–12.5 (дальний ИК)/(far infrared)	1.00066	0.07066
2.08–2.35 (длинноволновый средний ИК)/ (long-wavelength medium IR)	1.00034	0.05759

Главной задачей факторного анализа в данном исследовании являлось гашение остальной части ландшафтных помех. При этом первый фактор интерпретируется как максимально обусловленный естественными экзогенными составляющими ландшафта в пределах исследуемой площади. В некоторых случаях появляется возможность рассматривать достаточно надежно и несколько последующих факторов, как обусловленных экзогенными процессами. Остальные факторы рассматриваются как косвенные признаки, содержащие, в том числе, и информацию о ландшафтной аномалии, вызванной наличием рудного тела. Такую аномалию предлагается называть «рудопroduцируемая ландшафтная аномалия» (РПЛА).

После этого формируется окончательный массив признаков для описания особенностей отражательной способности ландшафтов, путем тщательно отбора самых важных из них.

Изначально признаковое пространство характеризуется анизотропией в различных направлениях. Метод главных компонент позволяет спроектировать это пространство на новые оси (главные компоненты), которые оптимально адаптированы к анизотропии этого пространства. Спроектированные значения фактора являются линейной комбинацией исходных признаков с коэффициентами, которые можно рассматривать как веса, с которыми признаки вошли в фактор.

Следующим этапом преобразования космоснимков является тематическая обработка, основой которой является кластерный анализ, так как требуется учесть множество косвенных параметров, не связанных непосредственно с прямыми признаками оруденения.

Кластерный анализ используется в связи с тем, что необходимо выполнить районирование площади (осуществить классификацию элементарных площадок) по множеству признаков. Построение кластеров (групп, классов, районов) является эффективным способом представления сложных, многомерных соотношений между объектами. При решении задачи кластеризации изучаемая площадь должна быть подразделена на множество элементарных площадок, каждая из которых описана набором признаков. Согласно этому требованию было использовано исходное разбиение изображений соответственно разрешению снимков. Конечным результатом анализа является определение принадлежности элементарных площадок к определенным типам из общего набора выделенных здесь кластеров.

Результаты и обсуждение

Объектом прогнозирования являлись золоторудные тела Радужного рудного поля. Рудное поле входит в состав Безенгийского рудного района в пределах Кабардино-Балкарской республики. Район приурочен к так называемой Северной впадине, сформировавшейся в ранне-среднеюрское время на границе горст-антиклинория Главного хребта и моноклинали Скалистого хребта. Фундаментом впадины является денудированная поверхность протерозойских метаморфических и палеозойских интрузивных образований. Сама впадина выполнена юрскими осадочными, эффузивными и субвулканическими образованиями.

Рельеф территории представляет собой сочетание сравнительно мягких, выложенных форм и резко расчлененных участков. Выделяются три типа рельефа. Первый связан с вулканическими массивами, метаморфическими и интрузивными породами и представлен относительно крутыми склонами хребтов под горно-лу-

говой разнотравной альпийской растительностью. Второй – с тектоническими понижениями, выполненными осадочными породами. Он характеризуется округлыми вершинными поверхностями и пологими склонами хребтов под горно-луговой субальпийской растительностью занятой пастбищами. Третий – с речной долиной р. Черек Хуламский (Безенгийский). Он представлен днищем троговой долины, заполненной моренными, флювиогляциальными, селевыми и аллювиальными отложениями, под березовыми лесами и злаково-разнотравными лугами. Абсолютные отметки колеблются от 1300 до 2800 м, относительные превышения водоразделов над долинами варьируют в пределах от 500 до 1000 м. Склоны рек, ручьев и балок круты, обрывисты, часто заняты осыпями и труднопроходимы. Пологие участки характеризуются заболоченностью.

В пределах Радужного месторождения продуктивная минерализация распространена в углеродистых терригенных отложениях нижней–средней юры. Основные запасы золота сосредоточены в Первой рудной зоне, где представлены пологой субпластовой залежью, расположенной в 10–30 м выше кровли гранитов, размером 450–500 м на 200–300 м в плане, вытянутой в северо-восточном направлении, с падением под углом 25–30° при мощности 15–30 м. Залежь содержит золотосульфидную минерализацию прожилково-вкрапленного минерально-морфологического типа.

Всесторонняя характеристика месторождения приведена в работах [Парада, 2017; Газеев и др., 2019; Кайгородова и др., 2022 и др.]. Следуя типизации [Wang et al., 2019] месторождение можно отнести к эпитермальным объектам **кислотно-сульфатного (высокосульфидизированного) генетического типа**. Содержание золота в рудах от 0,5–1 г/т до 440,3 г/т, серебра от 10–15 г/т до 10570,9 г/т.

В качестве исходных данных для прогнозирования взяты цифровые космоснимки с американского спутника Ландсат-7, выполненные в семи зонах спектра по нескольким годам (август 1999, июнь 2000, сентябрь 2002, май 2003 года) и цифровая модель рельефа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Исходные снимки охватывают большую площадь (порядка 32 000 км²), поэтому средствами комплекса ArcGis получены соответствующие фрагменты для исследуемой площади. Так как снимки координированы в системе UTM, то имеющаяся геологическая информация (геологические карты и разрезы) также приведена к этой системе координат. Математическая обработка осуществлялась в среде ГИС ИНТЕГРО.

Массив признаков для описания особенностей отражательной способности ландшафтов, созданный путем тщательного отбора самых важных из них, включает 29 характеристик: 1 – положение в шкале высотной поясности; 2 – принадлежность к относительно крупным сложным формам рельефа со специфическими ландшафтами типа речных долин, выположенных площадей столовых гор и куэст, протяженных участков склонов и т.п.; 3 – принадлежность к локальному рельефу простых мелких форм; 4 – уклон земной поверхности; 5 – ориентация склонов относительно сторон света; 6 – фактическая освещенность (помеха «свет-тень»); 7 – изображения местности на космоснимках 1999 г. в семи различных спектрах (см. табл. 1). Еще 16 признаков – это различия изображений на космоснимках для периодов весна–лето и лето–осень (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

**Признаки разностей фототона космических снимков, нормированных освещенностью и дисперсией, в разные вегетационные периоды:
а – август 1999, и – июнь 2000, с – сентябрь 2002, м – май 2003 /
Signs of differences in the phototone of space photographs, normalized by illumination and dispersion, in different vegetation periods:
a – August 1999, j – June 2000, s – September 2002, m – May 2003**

№ признака/ No. of the attribute	№ спектральной зоны/ No. of the spectral zone	Период/ Period
1	10	ис/ js
2	20	ис/ js
3	30	ис/ js
4	50	ис/ js
5	70	ис/ js
6	40	ис/ js
7	61	ис/ js
8	62	ис/ js
9	10	ам/ am
10	20	ам/ am
11	30	ам/ am
12	50	ам/ am
13	70	ам/ am
14	40	ам/ am
15	61	ам/ am
16	62	ам/ am

В результате факторного анализа в среде ГИС ИНТЕГРО 29 признаков (исходных параметров) сведены до 15 факторов.

Для кластеризации отбирались эндогенные факторы. Подразделение полученных 15 факторов на эндогенные и экзогенные осуществлялось визуально по весам (коэффициентам) исходных признаков на эти факторы путем последовательного визуального анализа графа и таблицы, отображающих их связи с конкретными природными объектами. При этом ключом для определения природы (смысла) фактора являлся высокий вес признака. В результате в качестве значимых принято 11 факторов, которые обусловлены эндогенными, в т.ч. рудообразующими процессами. На их основе и осуществлен кластерный анализ в среде ГИС ИНТЕГРО.

В результате кластеризации отобранных 11 факторов получено 83 типа элементарных площадок. Площадь эталонного объекта (рудного тела, выделенного по результатам геологической разведки) подразделяется по этим данным на 2 типа (рис. 1).

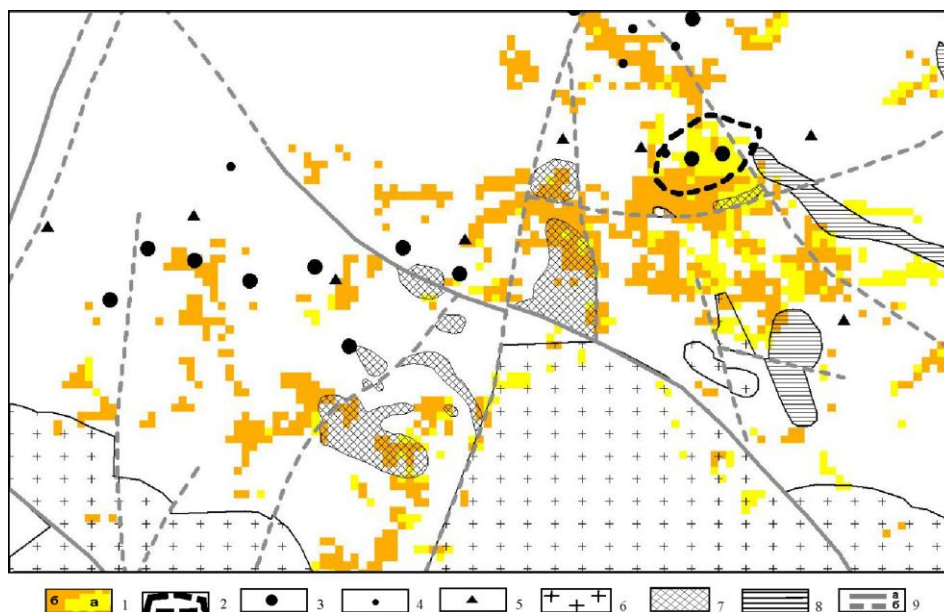


Рис. 1. Схематизированная карта локального прогноза золоторудных тел в пределах Радужного месторождения на геологической основе по результатам кластер-анализа космических снимков (размер элементарной площадки 30х30 м). Составили Д.Б.Давыденко, С.Г.Парада. 1 – площади (кластеры), перспективные по результатам кластер-анализа на обнаружение золотого оруденения с относительно богатыми (а) и относительно бедными (б) рудами; 2 – контур проекции Первой рудной залежи на дневную поверхность (эталон); 3–5 – скважины с различным содержанием золота: 3 – от 1 до 10 г/т, 4 – от 0.3 до 1 г/т, 5 – менее 0.3 г/т; 6 – палеозойские граниты; 7–8 – юрский вулканический комплекс: 7 – риолиты; 8 – трахиты; 9 – разломы установленные (а) и предполагаемые (б)/

Fig. 1. A schematized map of the local forecast of gold ore bodies within the Raduzhnoye deposit on a geological basis based on the results of a cluster analysis of satellite images (the size of the elementary site is 30x30m). Compiled by D.B.Davydenko and S.G.Parada. 1 – areas (clusters) promising according to the results of cluster analysis for the detection of gold mineralization with relatively rich (a) and relatively poor (b) ores; 2 – contour projection of the First ore deposit on the day surface (standard); 3–5 – wells with different gold content: 3 – from 1 to 10 g/t, 4 – from 0.3 to 1 g/t, 5 – less than 0.3 g/t; 6 – Paleozoic granites; 7–8 – Jurassic volcanic complex: 7 – rhyolites; 8 – trachytes; 9 – faults identified (a) and suspected (b)

Эти же типы, полученные в результате расчетов (кластеризации) за пределами рудного тела рассматриваются нами в качестве потенциальных золоторудных объектов на прилегающих площадях.

Заключение

Разработаны основы оригинальной технологии выявления аномального эффекта над рудными телами, в соответствии с которой получение спектрозональных характеристик космических снимков рассматривается как своеобразный геофизический метод исследования земных недр. Обращено внимание на то, что такие снимки фиксируют электромагнитные колебания в интервалах отражённого и излучённого частей спектра. Это определило использование методов, применяемых для выделения геофизических аномалий на фоне помех.

Применение технологии в пределах рудного поля месторождения золота Радужное (Кабардино-Балкарская республика) показало довольно высокую эффективность. Она обеспечила надёжное гашение ландшафтных помех и усиление ано-

мального эффекта, обусловленного наличием, не выходящих на дневную поверхность золотоносных минерализаций.

Ранее выявленное по результатам геологической разведки Первое рудное тело, использованное в качестве эталонного объекта, отчетливо проявилось в двух из 83 типов элементарных площадок, полученных при кластерном анализе. Площади распространения этих двух типов за пределами эталонной рудной залежи предлагается рассматривать в качестве признака локализации в недрах новых золотоносных минерализаций.

Литература

1. Абушкевич С.А., Волин К.А. Поиски золоторудных объектов на основе спектральных Характеристик космических снимков landsat и Worldview-1 (месторождения Сентачан и Полярник, Республика Саха). // Вестник СПбГУ. Сер. 7. – 2014. – Вып. 2. – С. 82–92.
2. Архипов А.И., Есипович С.М., Каушал А., Ковальчук С.П., Попов М.А., Станкевич С.А., Титаренко О.В. Уточнение границ залежей углеводородов на основе геоинформационного анализа материалов многоспектральной космической съемки и геолого-геофизических данных. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8. № 2. – С. 121–29.
3. Аэрокосмические методы геологических исследований. / Под ред. А.В. Перцова. – СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2000. – 316 с.
4. Бусыгин Б.С., Никулин С.Л. Комплексирование аэрокосмических и геолого-геофизических материалов при прогнозировании золоторудной минерализации. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2009. – Т. 6. № 2. – С. 17–23.
5. Бусыгин Б.С., Никулин С.Л., Свистун В.К. Геоинформационная технология прогноза скоплений метана в пределах шахтных полей Центрального Донбасса. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9. № 3. – С. 237–245.
6. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А. Мезозойские субщелочные породы центральной части Северного Кавказа: геодинамическая типизация, геохимия и минерогения. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 3. – С. 48–62. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36479.
7. Горный В.И., Тронин А.А. Обзор достижений последнего десятилетия в области применения спутниковых методов дистанционного зондирования при геологических и геофизических исследованиях. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9. № 5. – С. 116–32.
8. 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.
9. Дэвис Дж. С. Статистический анализ данных в геологии. Кн. 1. – М.: Недра, 1990. – 319 с.
10. Кайгородова Е.Н., Чугаев А.В., Лебедев В.А., Садасюк А.С., Гареев Б.И., Баталин Г.А. Ау-сульфидное месторождение Радужное (Северный Кавказ): геологическое строение, минералогические особенности и источники вещества. // Геология рудных месторождений. – 2022. – Т. 64. № 5. – С. 423–450. DOI: 10.31857/S0016777022040037.
11. Матишов Г.Г., Парада С.Г., Давыденко Д.Б. Выбор рудоперспективных площадей по результатам дистанционной флюидоиндексации как фактор рационального недропользования в условиях горных территорий. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2010. – № 3(5). – С. 57–62.
12. Парада С.Г. Перспективные типы месторождений и рудопроявлений золота Юга России. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 1. – С. 57–72. DOI: 10.23671/VNC.2017.1.9479.

13. Серокуров Ю.Н. Дистанционный прогноз проявлений кимберлитового магматизма в Южной Африке. // Отечественная геология. – 2013. – № 1. – С. 24–29.
14. Трифонов В.Г. 30 лет геологических исследований с помощью космических средств: тенденции, достижения, перспективы. // Исследования Земли из космоса. – 2010. – № 1. – С. 27–39.
15. Fan C., Myint S.W., Rey S.J. et al. Time series evaluation of landscape dynamics using annual Landsat imagery and spatial statistical modeling: Evidence from the Phoenix metropolitan region. // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2017. – Vol. 58. – pp. 12–25. DOI: 10.1016/j.jag.2017.01.009.
16. Ghaderpour E., Vujadinovic T. Change detection within remotely sensed satellite image time series via spectral analysis. // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12. No. 23. Art. No. 4001. DOI: 10.3390/rs12234001.
17. Liu X., Wang M., Zhang Ju., Wang Y., Yang Ju., Cheng J. Short-wave infrared spectroscopy studies on hydrothermal minerals for exploration of The Jiaoxi w deposit, Tibet, China. // Ore geology reviews. – 2025. – Vol. 176. Art. No. 106397. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2024.106397.
18. Milovsky G.A., Aparin A.D. Large-scale forecasting of gold mineralization in the central part of the Chukchi peninsula based on multizone satellite imagery of “Resource-P” (Geotone) and Landsat-7. // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2022. – Vol. 58. No. 12. – pp. 1581–1590. DOI: 10.1134/s0001433822120155.
19. Milovsky G.A., Aparin A.D., Ibragimov A.R., Tyukova E.E. Application of earth remote sensing materials to refine the gold deposit location within the Novogodnensk ore field in The Polar Urals. // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2024. – Vol. 60. No. 9. – pp. 1137–1146. DOI: 10.1134/S0001433824701093.
20. Wang K., Zhang L., Tiejian Li., Xiang Li., Biyun G., Guoxin Ch., Yuefei H. and Jiahua W. Side Tributary distribution of quasi-uniform iterative binary tree. Networks for River Networks. // Frontiers in Environmental Science. – 2022. – Vol. 9. Art. No. 792289. DOI: 10.3389/fenvs.2021.792289.
21. 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.
22. Zhang X. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California). // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2007. – Vol. 62. No. 4. – pp. 271–282.

References

1. Abushkevich S.A., Volin K.A. Prospecting for gold ore objects based on spectral Characteristics of landsat and Worldview-1 satellite images (Sentachan and Polyarnik deposits, Sakha Republic). Bulletin of Saint Petersburg State University. Ser. 7. 2014. Issue 2. pp. 82–92. (In Russ.)
2. Arkhipov A.I., Esipovich S.M., Kaushal A., Kovalchuk S.P., Popov M.A., Stankevich S.A., Titarenko O.V. Hydrocarbon deposit boundaries alignment using geoinformation analysis of multispectral space imagery and geological and geophysical data. Sovremennye Problemy Distsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. 2011. Vol. 8. No. 2. pp. 121–29. (In Russ.)
3. Aerospace methods of geological research. Ed. A.V. Pertsov. Saint Petersburg. Publishing house of Saint Petersburg kartfabriki VSEGEI. 2000. 316 p. (In Russ.)
4. Busygin B.S., Nikulin S.L. Integration of aerospace and geological and geophysical materials in predicting gold mineralization. Sovremennye Problemy Distsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. 2009. Vol. 6. No. 2. pp. 17–23. (In Russ.)
5. Busygin B.S., Nikulin S.L., Svistun V.K. Geoinformation technology for forecasting methane accumulations within the Donetsk basin mine fields. Sovremennye Problemy Distsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. 2012. Vol. 9. No. 3. pp. 237–245. (In Russ.)
6. Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Kondrashov I.A. Mesozoic subalkaline rocks of Central part of the Northern Caucasus: geodynamical typification, geochemistry and minerageny. Geology and

Geophysics of Russian South. 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 47–62. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36479. (In Russ.)

7. Gornyy V.I., Tronin A.A. Review of the last decade major achievements of remote sensing methods application on the geological & geophysical problems solution. *Sovremennye Problemy Distsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2012. Vol. 9. No. 5. pp. 116–32. (In Russ.)

8. 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.)

9. Davis J.S. Statistical data analysis in geology. Book 1. Moscow. Nedra. 1990. 319 p. (In Russ.)

10. Kaigorodova E.N., Chugaev A.V., Lebedev V.A., Sadasyuk A.S., Gareev B.I., Batalin G.A. The Raduzhnoe au–sulfide deposit (Northern Caucasus): geological settings, mineralogy, and sources of metals. *Geology of Ore Deposits*. 2022. Vol. 64. No. 5. pp. 423–450. DOI: 10.31857/S0016777022040037. (In Russ.)

11. Matishov G.G., Parada S.G., Davydenko D.B. The choice of ore-promising areas based on the results of remote fluidindexation as a factor of rational subsurface use in mountainous areas. *Sustainable Development of Mountainous Territories*. 2010. No. 3(5). pp. 57–62. (In Russ.)

12. Parada S.G. Promising types of gold deposits and ore manifestations of Russian South. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2017. No. 1. pp. 57–72. DOI: 10.23671/VNC.2017.1.9479. (In Russ.)

13. Serokurov Yu.N. Remote prediction of kimberlite magmatism in South Africa. *Otechestvennaya Geologiya*. 2013. No. 1. pp. 24–29. (In Russ.)

14. Trifonov V.G. 30 years of geological research using space facilities: trends, achievements, prospects. *Earth Research from Space*. 2010. No. 1. pp. 27–39. (In Russ.)

15. Fan C., Myint S.W., Rey S.J. et al. Time series evaluation of landscape dynamics using annual Landsat imagery and spatial statistical modeling: Evidence from the Phoenix metropolitan region. *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2017. Vol. 58. pp. 12–25. DOI: 10.1016/j.jag.2017.01.009.

16. Ghaderpour E., Vujadinovic T. Change detection within remotely sensed satellite image time series via spectral analysis. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. No. 23. Art. No. 4001. DOI: 10.3390/rs12234001.

17. Liu X., Wang M., Zhang Ju., Wang Y., Yang Ju., Cheng J. Short-wave infrared spectroscopy studies on hydrothermal minerals for exploration of The Jiaoxi w deposit, Tibet, China. *Ore geology reviews*. 2025. Vol. 176. Art. No. 106397. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2024.106397.

18. Milovsky G.A., Aparin A.D. Large-scale forecasting of gold mineralization in the central part of the Chukchi peninsula based on multizone satellite imagery of “Resource-P” (Geotone) and Landsat-7. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022. Vol. 58. No. 12. pp. 1581–1590. DOI: 10.1134/s0001433822120155.

19. Milovsky G.A., Aparin A.D., Ibragimov A.R., Tyukova E.E. Application of earth remote sensing materials to refine the gold deposit location within the Novogodnensk ore field in The Polar Urals. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2024. Vol. 60. No. 9. pp. 1137–1146. DOI: 10.1134/S0001433824701093.

20. Wang K., Zhang L., Tiejian Li., Xiang Li., Biyun G., Guoxin Ch., Yuefei H. and Jiahua W. Side Tributary distribution of quasi-uniform iterative binary tree. *Networks for River Networks*. *Frontiers in Environmental Science*. 2022. Vol. 9. Art. No. 792289. DOI: 10.3389/fenvs.2021.792289.

21. 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.

22. Zhang X. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2007. Vol. 62. No. 4. pp. 271–282.

УДК 504.064.2.001.18

DOI: 10.46698/VNC.2025.82.17.001

Оригинальная статья

Оценка применимости моделей машинного обучения для прогноза гидроэкологического состояния малых рек

В.П. Долгих 

Донбасский государственный технический университет,
Россия, 294204, г. Алчевск, пр. Ленина, 16,
e-mail: vidoscience@mail.ru

Статья поступила: 02.07.2025, доработана: 09.09.2025, принята к публикации: 15.09.2025

Резюме: Актуальность работы. Водосборная территория р. Белая вблизи г. Луганска подвергается природным и антропогенным факторам, которые связаны с закрытием угольных шахт. Использование современных методов машинного обучения позволит спрогнозировать расход воды в реке и наметить пути по достаточному обеспечению промышленности и населения. **Цель исследования.** Месячное прогнозирование расхода воды на основе нескольких методов машинного обучения (ARIMA, SARIMAX, LSTM, CatBoost). **Методы исследования.** Рассмотрены данные по расходу воды, средней температуре воздуха, средней скорости ветра, суточной сумме осадков и рассчитанному в результате химического анализа сухому остатку из проб воды на уровнемерном посту, который находится ближе всего к Исаковскому водохранилищу. На оригинальных данных построены прогностические модели, рассчитаны соответствующие средние абсолютные ошибки и показана возможность построения эффективной системы для месячного прогнозирования расхода воды. С целью оценки взаимовлияния задаваемых данных предлагается использовать факторный анализ. **Результаты.** В результате исследования выявлена достаточная для практических целей применимость алгоритма градиентного бустинга (CatBoost), использующего задаваемую гидрометеорологическую информацию на водосборе. Реализация моделей выполнена с использованием открытых программных библиотек на языке Python, что подтверждает возможность широкого использования описанных методик для научных исследований и решения прикладных задач. Дополнительно сформированы группы взаимовлияния факторов и дана их оценка. Полученные результаты являются одним из важных составляющих для программно-технического инструментария, необходимого для выявления закономерностей многофакторного процесса формирования стока поверхностных водных объектов и прогнозирования расхода воды для рассматриваемой водосборной территории.

Ключевые слова: модели речного стока, модели машинного обучения, прогнозирование речного стока, река Белая.

Благодарности: Исследования выполнены за счет средств федерального бюджета (код темы: FRRU-2024-0004 в ЕГИСУ НИОКТР).

Для цитирования: Долгих В.П. Оценка применимости моделей машинного обучения для прогноза гидроэкологического состояния малых рек. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 148–161. DOI: 10.46698/VNC.2025.82.17.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.82.17.001

Original paper

Assessment of the applicability of machine learning models for forecasting the hydroecological state of small rivers

V.P. Dolgikh 

Donbass State Technical University,
16 Lenin Ave., Alchevsk 294204, Russian Federation,
e-mail: vidoscience@mail.ru

Received: 02.07.2025, revised: 09.09.2025, accepted: 15.09.2025

Abstract: Relevance. The catchment area of the Belaya River near Luhansk is exposed to natural and anthropogenic factors associated with the closure of coal mines. The use of modern machine learning methods will make it possible to predict the flow of water in a river and identify ways to provide sufficient supplies to industry and the public. **Aim.** Monthly prediction of water consumption based on several machine learning methods (ARIMA, SARIMAX, LSTM, CatBoost). **Methods.** The data of water flow rate, average air temperature, average wind speed, daily precipitation and dry residue, calculated as a result of chemical analysis from water samples at the level measuring station, which is located closest to the Isakovskoye Reservoir, are considered. Prognostic models are built on the original data, the corresponding average absolute errors are calculated and the possibility of building an effective system for monthly forecasting of water flow rate is shown. In order to assess the mutual influence of the specified data, it is proposed to use factor analysis. **Results.** As a result of the study, the applicability of the gradient boosting algorithm (CatBoost), which uses preset hydrometeorological information in the catchment area, has been revealed. The models are implemented using open software libraries in Python, which confirms the possibility of widespread use of the described techniques for scientific research and solving applied problems. Additionally, groups of mutual influence of factors were formed and their assessment was given. The obtained results are one of the important components for software and hardware tools necessary for identifying patterns of the multifactorial process of formation of runoff of surface water bodies and forecasting water consumption for the considered catchment area.

Keywords: river flow models, machine learning models, river flow forecasting, Belaya River.

Acknowledgements: The research was carried out at the expense of the federal budget (subject code: FRRU-2024-0004 at EGISU NIOKTR).

For citation: Dolgikh V.P. Assessment of the applicability of machine learning models for forecasting the hydroecological state of small rivers. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 148-161. DOI: 10.46698/VNC.2025.82.17.001

Введение

Методы расчета и прогнозирования речного стока, основанные на физико-математической интерпретации взаимосвязей между компонентами в моделях, получили широкое распространение для решения различных научных и прикладных задач [Мотовилов, 2016а, б; Beven, 2020]. Их главное достоинство – возможность оценки реакции составляющих гидрологического цикла на изменения характеристик климатической системы. Однако наличие сложной параметризации описываемых в моделях гидродинамических процессов не позволяет в полной мере проводить различные оценки влияния отдельных факторов на поверхностный речной сток [Борщ и др., 2023; Погорелов и др., 2023; Borsch et al., 2022; Долгих и др., 2024].

Решение указанной проблемы может быть достигнуто при использовании высокопроизводительных вычислительных систем. Новые расчетные алгоритмы, которые «обучаются» на основании накопленных баз данных, получили название «модели машинного обучения» (ML). Интерес практикующих исследователей объясняется доступностью открытого исходного кода, обилием подгружаемых в программы библиотек, возможностями доработки существующих проектов под требования конкретных задач. ML характеризуются непритязательностью к задаваемым массивам данных, что является весомым преимуществом, потому что при построении математических моделей формирования стока отсутствует возможность максимально детализировать все процессы и учесть неопределенности. Приведенное обстоятельство дает возможность научиться строить модели и оперативно получать результаты, что способствует интересу исследователей к решению достаточно сложных задач, в частности, гидроэкологической оценке состояния речного стока.

В настоящем исследовании предпринята попытка продемонстрировать возможность построения алгоритма прогнозирования речного стока на период до месяца [Свод правил ..., 2023] с помощью ряда моделей: интегрированной модели авторегрессии-скользящего среднего Auto Regressive Integrated Moving Average (ARIMA), сезонной авторегрессионной интегрированной скользящей средней с экзогенными регрессорами Seasonal ARIMA with eXogenous regressors (SARIMAX), модели с долгосрочной кратковременной памятью Long short-term memory (LSTM) и алгоритма градиентного бустинга (CatBoost). В качестве объекта исследования используется бассейн малой реки Белая, истоки которой находятся в районе с. Тимирязево Перевальского района. Прогнозы речного стока заблаговременностью до месяца строятся для равномерного поста реки Белая, являющегося замыкающим перед Исаковским водохранилищем. В статье приводятся описания архитектур моделей, характеристики рядов наблюдений, расчеты ошибок прогнозирования расхода воды в реке. Дополнительно оценивается взаимовлияние прогностических факторов, что имеет отдельную научную и практическую ценность в связи с изменяющимися гидрологическими процессами в бассейне водосбора р. Белая после закрытия угольных шахт.

Объект исследования

Малая река Белая является правым притоком реки Лугань и относится к бассейну реки Северский Донец. Протекает по территории Перевальского, Лутугинского и Славяносербского районов. Река Белая впадает в реку Лугань между п. Сабовкой Славяносербского района и г. Александровском (Артемовский район г. Луганска). Общая протяженность реки составляет 88 км, площадь водосбора – 755 км² [Смирнова, Вознюк, 2023]. Климат в бассейне реки Белая характеризуется как умеренно континентальный с довольно жарким засушливым летом и сравнительно холодной зимой с неустойчивым снежным покровом. Слой осадков по водосбору реки не одинаков и в зависимости от зон, располагаемых севернее и южнее г. Перевальска, колеблется в среднем от 525 до 354 мм осадков в год.

Особенностью территории является то, что площадь водосбора реки от истока до плотины Исаковского водохранилища подработана крупными закрытыми шахтами: «Фащевская», имени С. В. Косиора, «Селезнёвская», «Перевальская». Также обнаружены выработки 63-х старых мелких шахт: на левой стороне водосбора – 24 шахты, на правой – 23 шахты и на р. Чернухина, левом притоке р. Белая – 16 шахт [Крамаренко и др., 2022; Коптева, 2023]. С учетом климатических изменений, связанных с возобновившимся периодом засухи с 2021 года, питание реки осуществляется в основном подземными водами, которые поступают в поверхностный сток с шахтными. Данное обстоятельство вносит свой вклад в экологическую безопасность территории и должно учитываться для ведения хозяйственной деятельности населения и планирования работы промышленных предприятий.

Суммарный модуль стока реки Белая составляет в устье 2,2 л/с с км² [Правила эксплуатации ..., 2003]. Для данного исследования был выбран уровнемерный пост реки Белая возле поссовета пгт. Бугаевки, который является аккумулярующим звеном перед Исаковским водохранилищем. Наблюдения именно в этой зоне замеров являются наиболее важными, потому что с речной водой, в которую поступают шахтные воды, в водохранилище попадают различные химические компоненты (ионы кальция, гидрокарбонат-ионы, сульфат-ионы и др. компоненты), которые и формируют общее представление о состоянии искусственного водоема.

Материалы и методы исследований

Наборы исходных данных для уровнемерного поста созданы на основе проведения полевых исследований сотрудниками Молодежной научно-исследовательской лаборатории геоэкологии и прикладной химии в 2024 году (от 04.04.2024 г. до 24.12.2024 г.). Исходная информация представлена тремя группами данных: данные о состоянии поверхностного стока, метеоданные (от информационных сервисов погоды) и данные, полученные в результате проведения химического анализа. В качестве задаваемого массива были выбраны параметры, фрагмент которых приведен в таблице 1.

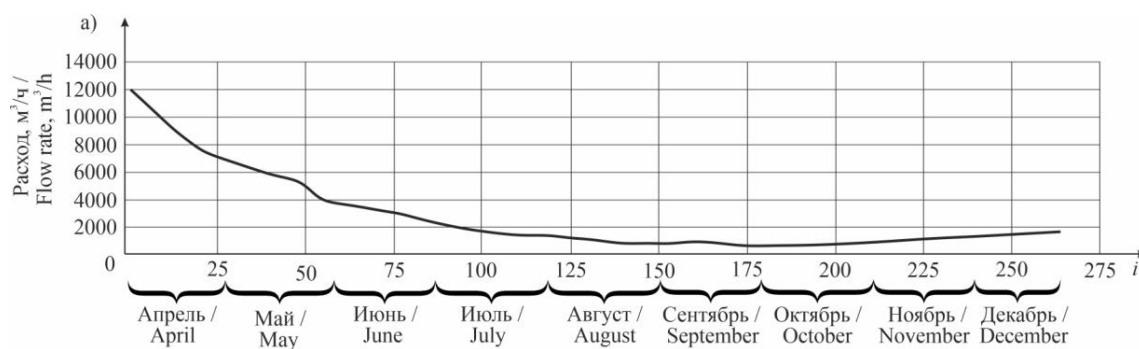
Таблица 1 / Table 1

**Массив исходных данных после предварительной обработки (фрагмент) /
Array of initial data after preliminary processing (fragment)**

Номер замера (i) / Measurement number (i)	Дата замера / Date of measurement	Данные о состоянии поверхностного стока / Surface runoff data	Метеоданные / Weather data			Химический анализ / Chemical analysis
		Расход (Q), м ³ /ч / Flow rate (Q), m ³ /h	Средняя температура воздуха [https://global-weather.ru], °C / Average air temperature [https://global-weather.ru], °C	Средняя скорость ветра [https://www.meteoblue.com], м/с / Average wind speed [https://www.meteoblue.com], m/s	Количество осадков [https://www.meteoblue.com], мм / Amount of precipitation [https://www.meteoblue.com], mm	Сухой остаток, мг/дм ³ / Dry residue, mg/dm ³
1	04.04.24	12171	14,5	5,3	0	648
2	05.04.24	11924	10	3,3	0	662
3	06.04.24	11677	10	2,2	0	677
...	...	...	...	...	...	...
263	22.12.24	1612	3,5	4,4	1,6	2529
264	23.12.24	1623	5,5	6,1	1,2	2532
265	24.12.24	1635	5	2,8	0	2534

Фактические замеры проводились не реже одного раза в неделю, но для более полной картины изменения уровня воды и сопутствующих параметров использовался метод линейной интерполяции [Данилов, Гарькина, 2014].

Распределение параметров на рассматриваемом временном диапазоне приведено на рисунке 1.



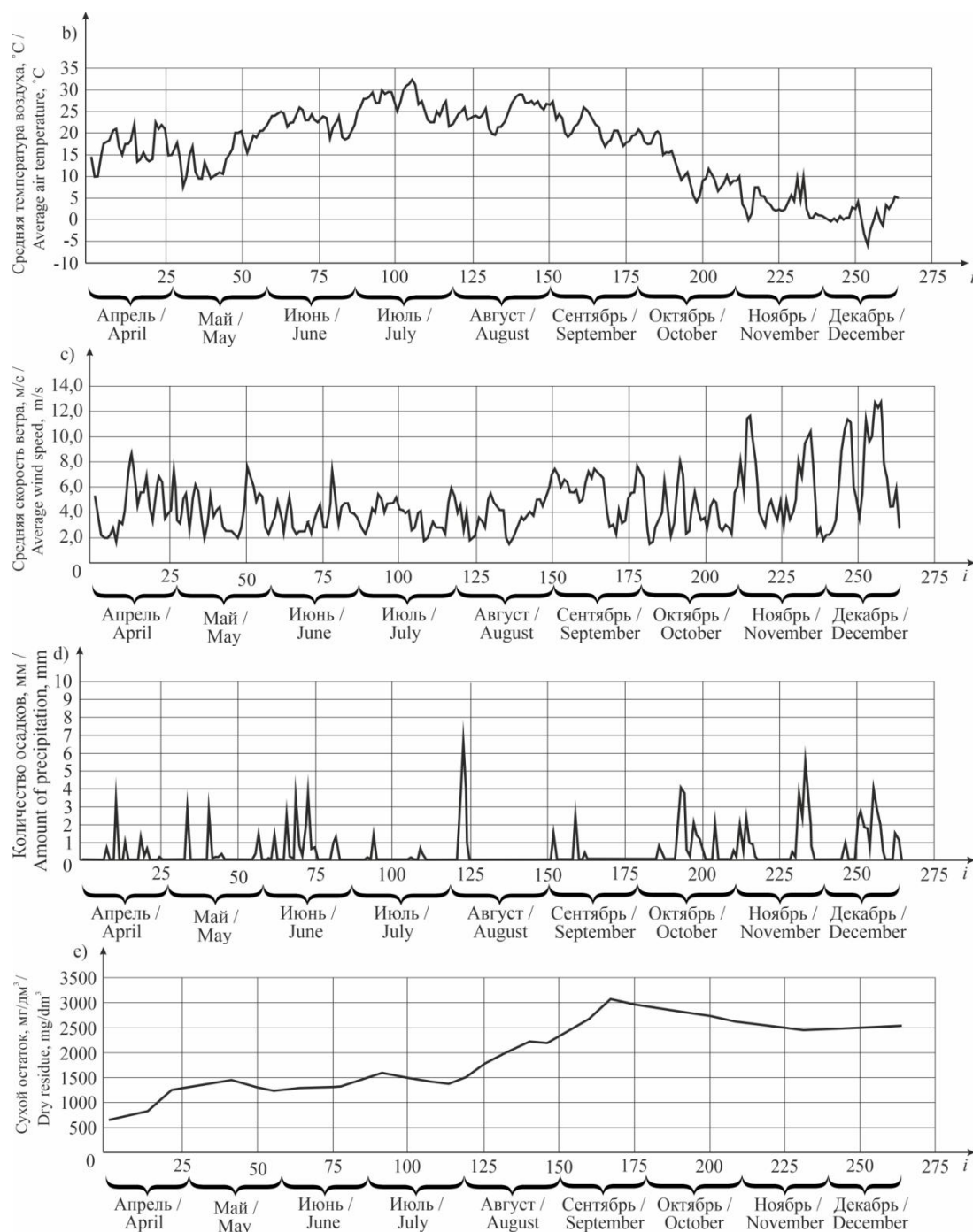


Рис. 1. Распределение исходных данных за исследуемый период /

Fig. 1. Distribution of initial data for the period under study

Для прогнозирования расхода воды в р. Белая были построены несколько моделей машинного обучения. Программная реализация выполнена на языке Python [Daniel, 2023; Deepali, Gresha, 2023; John, 2023; Stewart, 2023] в интерактивной оболочке Scientific Python Development Environment (Spyder), специальной IDE для научных исследований, машинного обучения и анализа данных. В качестве стандартных библиотек машинного обучения использовались scikit-learn и Tensorflow.

Исследования проводились с использованием следующих программных архитектур:

– интегрированной модели авторегрессии-скользящего среднего (ARIMA), в которой заложен алгоритм прогнозирования будущих значений только на основании предыдущих значений временного ряда [Артамонов и др., 2021];

– сезонной авторегрессионной интегрированной скользящей средней с экзогенными регрессорами (SARIMAX), которая расширяет возможности традиционной модели ARIMA путем учета сезонности и ряда внешних факторов [Trancart et al., 2013];

– модели с долгосрочной кратковременной памятью (LSTM), которая является модификацией рекуррентной нейронной сети и используется для решения задач глубокого обучения с дополнительными переменными состояниями, где необходимо сохранять веса отдельных нейронов и передавать их между расчетными шагами при обучении алгоритма, если их значение приводит к снижению ошибки модели [Vennerod et al., 2021];

– алгоритма градиентного бустинга, специально разработанного для эффективной обработки категориальных признаков и расчета регрессии CatBoost (категориальное бустинг-обучение) [Prokhorenkova et al., 2018; Hancock, Khoshgoftaar, 2020].

Модели ARIMA и SARIMAX достаточно подробно представлены в научной литературе [Артамонов и др., 2021; Douglas et al., 2015]. С целью ознакомления с принципами построения алгоритмов LSTM и CatBoost далее приводится их краткое описание.

Модель с долгосрочной кратковременной памятью сохраняет информацию о состояниях между расчетными шагами и на основании параметров регуляторов памяти определяет, как долго сохранять эту информацию и когда она больше не понадобится. Общий вид архитектуры сети LSTM представлен на рисунке 2.

Работа модели LSTM и ее компонентов заключается в следующем. Ячейка имеет три внутренних блока, называемых регуляторами входа (input gate), выхода (output gate) и памяти (forget gate). Эти регуляторы управляют внутренним состоянием ячейки c_t и скрытым состоянием h_t . В оранжевых блоках отображено, как входной вектор $x_t[n-1]$ и предыдущее скрытое состояние $h_{t-1}[m; 1]$ умножаются соответственно на четыре различные матрицы $W_j[m; m+n]$ и суммируются соответственно с четырьмя различными смещениями $b_j[m; 1]$.

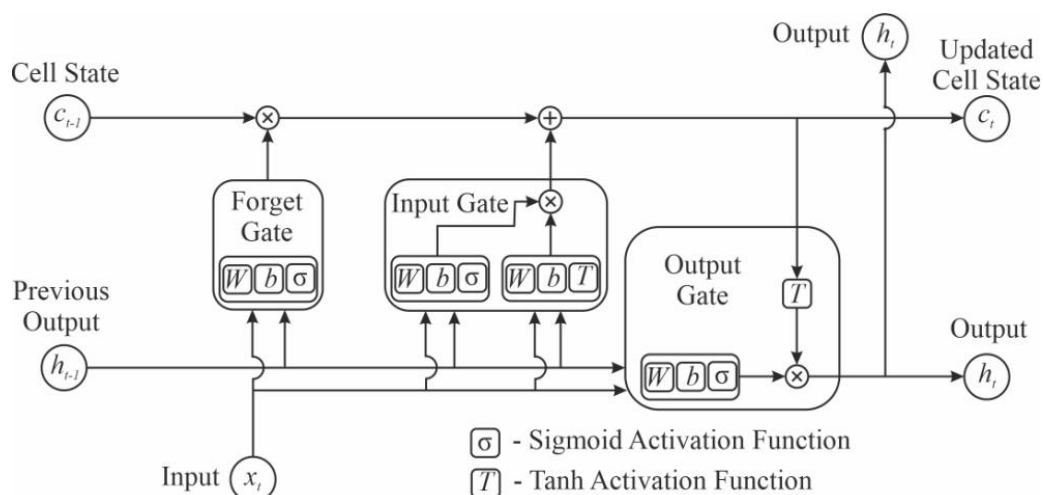


Рис. 2. Архитектура модели LSTM [Vennerod et al., 2021] /

Fig. 2. LSTM model architecture [Vennerod et al., 2021]

Выходы этих регуляторов в дальнейшем используются как для обновления состояния самой модели с целью формирования $s_t[m-1]$, так и для вычисления нового скрытого состояния $h_t[m; 1]$. Обозначения $[m; 1]$ и $[m; m + n]$ – размеры матриц, «крестик» в регуляторах – это скалярное произведение, а «плюсик» – сложение. Четыре комбинации матрицы W , смещения b и функции активации, которая является сигмодой или гиперболическим тангенсом, можно рассматривать как однослойную нейронную сеть.

Для программной реализации алгоритма LSTM выборка значений делилась на обучающую (80 % от данных с апреля по июль), валидационную (20 % от данных с апреля по июль) и тестовую (данные за август).

Алгоритм градиентного бустинга CatBoost представляет собой эффективный метод ансамблевого обучения, в котором объединяются слабые модели прогнозирования для создания надежной прогностической модели [Prokhorenkova et al., 2018; Hancock, Khoshgoftaar, 2020]. Алгоритм работает путем итеративного добавления новых моделей в ансамбль, каждая из которых обучается тому, чтобы исправлять ошибки предыдущих моделей. Особенностью алгоритма является то, что обработка признаков происходит без необходимости их предварительной обработки, что делает его эффективным инструментом для работы с реальными наборами данных. Дополнительным преимуществом выступает добавление коэффициента регуляризации в функцию потерь, используемую в процессе обучения, что предотвращает переобучение и улучшает способности модели к обобщению данных.

Алгоритм CatBoost начинает с предположения, часто представляющего собой среднее значение целевой переменной. Далее он итеративно создает ансамбль деревьев, минимизируя функцию потерь с помощью градиентного спуска. На каждой итерации он вычисляет отрицательный градиент функции потерь по отношению к текущим прогнозам и «подгоняет» новое дерево под отрицательный градиент. Скорость обучения определяет размер шага при градиентном спуске. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет добавлено заданное количество деревьев или не будет достигнут критерий сходимости. При составлении прогнозов CatBoost объединяет прогнозы всех деревьев в ансамбле. Такое объединение прогнозов приводит к созданию высокоточных и надежных моделей.

Математическое описание категориального бустинг-обучения сводится к следующему. Учитывая набор обучающих данных, состоящий из N выборок и M признаков, где каждая выборка обозначается как (x_i, y_i) , где x_i – это вектор из M признаков, а y_i – соответствующая целевая переменная, CatBoost стремится изучить функцию $F(x)$, которая предсказывает целевую переменную y .

$$F(x) = F_0(x) + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N f_m(x_i), \quad (1)$$

где $F(x)$ – общая функция прогнозирования, которую CatBoost стремится изучить. Она принимает входной вектор x и прогнозирует соответствующую целевую переменную y ;

$F_0(x)$ – начальное предположение (базовый прогноз), который часто устанавливается как среднее значение целевой переменной в обучающем наборе данных и отражает общее среднее поведение целевой переменной;

$\sum_{m=1}^M$ – обозначает суммирование по ансамблю деревьев (M – общее количество деревьев в ансамбле);

$\sum_{i=1}^N$ – обозначает суммирование по обучающим выборкам (N – общее количество обучающих выборок);

$f_m(x_i)$ – прогноз m -го дерева для i -й обучающей выборки.

Из уравнения (1) следует, что общий прогноз $F(x)$ получается путем суммирования начального предположения $F_0(x)$ с прогнозами каждого дерева $f_m(x_i)$ для каждой обучающей выборки. Это суммирование выполняется для всех деревьев (m) и всех обучающих выборок (i).

Принцип построения и реализации модели для прогнозирования расхода воды с использованием CatBoost заключался в выделении целевого признака (расход воды), задании смещения (5 шагов до начала расчета с целью улучшения сходимости дальнейших результатов) и выборе диапазона для обучения (апрель 2024 – июль 2024). Следующим шагом было нормирование данных, корреляция параметров и выбор значимости факторов (все факторы оказались значимыми). После обучения модели добавлялись данные за август, проводилось прогнозирование и сравнение с реальными данными.

Результаты исследований и их обсуждение

Задача прогнозирования ставится следующим образом. На основании имеющихся исходных данных требуется осуществить прогноз расхода малой реки на месяц вперед. В качестве примера выбран август 2024 года, т.к. в этот период наблюдалось снижение количества воды в реке, однако в дальнейших исследованиях при наличии дополнительных данных планируется выполнить проверку алгоритма для произвольных временных диапазонов.

Для оценки качества прогноза предлагается использовать ошибку между фактическими и прогнозными значениями рассматриваемой переменной, определяемую функцией потерь MAPE (средняя абсолютная ошибка в процентах). Метрика MAPE получила широкое распространение в ML. Обеспечение минимальной ошибки прогнозирования проводится в соответствии со следующим условием:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_i - \tilde{Q}_i}{Q_i} \right| \cdot 100\% \rightarrow \min, \quad (2)$$

где Q_i – значение расхода в i -й момент времени наблюдения;

i – номер наблюдения ($i=1 \dots n$);

n – количество наблюдений ($n=31$);

$\tilde{Q}_i$ – прогнозное значение расхода для i -го наблюдения.

Результаты расчетов

Результаты расчетов функции потерь MAPE представлены в таблице 2, а графическая интерпретация на рисунке 3.

Таблица 2 / Table 2

Результаты расчета функции потерь MAPE для прогнозирования расхода воды в реке различными алгоритмами /
Results of calculating the MAPE loss function for predicting water flow in a river using different algorithms

Функция потерь / Loss function	Расчетный алгоритм / Calculation algorithm			
	ARIMA	SARIMAX	LSTM	CatBoost
MAPE, %	18,31	12,72	14,76	4,92

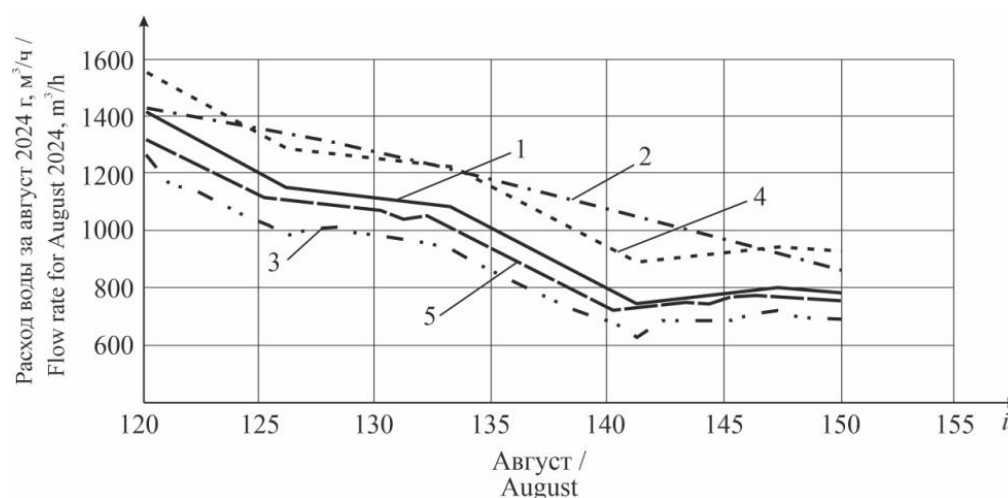


Рис. 3. Результаты прогнозирования (август 2024 г.)

1 – реальные данные; 2 – ARIMA; 3 – SARIMAX; 4 – LSTM; 5 – CatBoost /

Fig. 3. Forecasting results (August 2024)

1 – real data; 2 – ARIMA; 3 – SARIMAX; 4 – LSTM; 5 – CatBoost

Сравнение результатов расчетов расхода воды в реке Белая за август 2024 года, полученных различными методами прогнозирования, с реальными данными дает основание утверждать, что алгоритм градиентного бустинга CatBoost показал наименьшую погрешность (4,92 %). Несмотря на небольшую выборку значений, предлагаемый алгоритм машинного обучения показал свою эффективность. Полученный результат учел сезонность рассматриваемого процесса, что полностью не удалось ARIMA. Модель с долгосрочной кратковременной памятью повторила вид кривой, но оказалась выше реальной в среднем на 12,75 %, однако с удалением от начального значения расхода наблюдалось увеличение разности (15,75 %). SARIMAX была точнее, чем ARIMA, однако наблюдалось запаздывание результатов, что отразилось на MAPE (12,72 %).

С целью выявления степени влияния исследуемых данных, а также формирования групп параметров, тесно связанных между собой, проводился факторный анализ. Алгоритм расчета выполнен на языке Python и учитывает данные таблицы 1, в которой отсутствуют пропуски. На первом шаге расчета ставилась задача определения количества групп факторов, результаты которых схожи между собой и имеют взаимосвязь. Результаты изображены на рисунке 4.

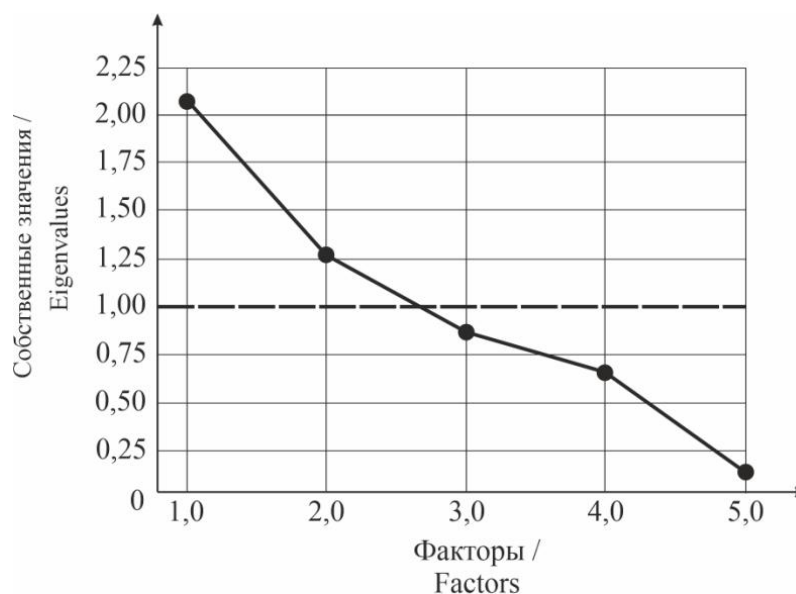


Рис. 4. Графическое представление количества факторов, рекомендуемых программой /
Fig.4. Graphical representation of the number of factors recommended by the program

Несмотря на установленную границу на уровне 1 (собственные значения) в дальнейшем принимались 4 группы факторов, для которых была рассчитана корреляционная матрица между пятью переменными (таблица 1) и полученными четырьмя факторами. При использовании специальной библиотеки для создания статистических графиков Seaborn результаты исследований могут быть представлены в виде тепловой карты. В данном случае полученная информация, которая отражает корреляции переменных с каждым из выделенных факторов и позволяет выделить закономерности взаимовлияния отдельных составляющих друг на друга, представлена в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

**Представление группировки переменных в факторы согласно
рассчитанной корреляции между ними /
Representation of the grouping of variables into factors according
to the calculated correlation between them**

Переменные / Variables	Факторы / Factors			
	Фактор 1 / Factor 1	Фактор 2 / Factor 2	Фактор 3 / Factor 3	Фактор 4 / Factor 4
Расход / Flow rate	92,9 %	9,5 %	10,0 %	0,9 %
Средняя температура воздуха / Average air temperature	6,4 %	71,4 %	24,8 %	0,4 %
Сухой остаток / Dry residue	87,5 %	46,7 %	2,9 %	5,8 %
Средняя скорость ветра / Average wind speed	10,8 %	32,1 %	45,8 %	13,8 %
Количество осадков / Amount of precipitation	1,3 %	7,8 %	45,5 %	3,1 %

При анализе таблицы 3 сделаны следующие выводы. Для фактора 1 характерно, что изменение расхода воды (92,9 %) тесно связано с появлением в воде сухого остатка (87,5 %). Вполне очевидно, что уменьшение уровня воды в реке приводит к повышению концентрации растворенных веществ и повсеместному накоплению вдоль водотока, что в дальнейшем приводит к попаданию их в технологический цикл работы предприятий и к использованию для хозяйственных нужд воды с повышенным содержанием минеральных солей. Данное обстоятельство подтверждается регулярными полевыми наблюдениями и отборами проб по водосборной территории р. Белая.

Фактор 2 показывает высокую взаимосвязь между средней температурой воздуха (71,4 %), средней скоростью ветра (32,1 %) и сухим остатком (46,7 %). Такой результат также не вызывает сомнений, потому что повышенная температура и сильный ветер приводят к интенсификации испарения жидкости и, тем самым, ускоряют процессы минерализации солей (кальция, магния, натрия, калия), слипания органических частиц, металлов и нерастворимых элементов.

Согласно фактору 3 необходимо учитывать взаимосвязь средней скорости ветра (45,8 %), средней температуры воздуха (24,8 %) и количества осадков (45,5 %). Полученные взаимосвязи также вполне объяснимы, потому что насыщенные влагой воздушные массы могут переноситься ветром на значительные расстояния.

В сравнении с тремя предыдущими факторами четвертый фактор не вносит никакой дополнительной информации. Такая проверка полезна с целью использования всех возможностей программного анализа данных, однако требует качественного понимания полученных результатов.

Выводы

Выполненные расчеты позволили оценить применимость моделей (ARIMA, SARIMAX, LSTM, CatBoost) в качестве основы для системы месячных прогнозов расходов воды в речной системе. Расчеты подтвердили общее представление о том, что наличие гидрометеорологической информации (данных о предыдущих расходах воды в р. Белая, средней температуре воздуха на водосборе, средней скорости ветра и количестве осадков) и рассчитанного в результате химанализа сухого остатка может быть использовано для прогнозов. Данное обстоятельство позволяет создавать более устойчивые алгоритмы, которые учитывают сезонные колебания, а также взаимовлияния между прогнозирующими факторами.

Программная реализация всех моделей показала свою эффективность, однако наилучшие результаты получены с использованием алгоритма градиентного бустинга CatBoost (средняя абсолютная ошибка составила 4,92 %, что в 2–3 раза меньше, чем у других моделей). Факторный анализ позволил выделить группы (факторы), в которых расчетным путем получены степени влияния исследуемых данных друг на друга. Полученные результаты станут основой для создания программно-технического инструментария для выявления закономерностей многофакторного процесса формирования стока поверхностных водных объектов, который в том числе позволит прогнозировать расходы воды для рассматриваемой водосборной территории.

Литература

1. Артамонов Н.В., Ивин Е.А., Курбацкий А.Н., Фантаццини Д. Введение в анализ временных рядов. Вологда: ВолНИЦ РАН, 2021. – 134 с.
2. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России. М.: Гидрометцентр России, 2023. – 200 с.

3. Данилов А.М., Гарькина И.А. Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем. Пенза: ПГУАС, 2014. – 168 с.
4. Долгих В.П., Рыбалка С.В., Боблева И.С. Краткосрочное прогнозирование водного режима рек и водохранилищ методом Брауна. // Экологический вестник Донбасса. – 2024. – № 12. – С. 9–15.
5. Коптева А.К. О влиянии подземной добычи угля на водные ресурсы реки Белая и наполняемость Исаковского водохранилища в Луганской народной Республике. // Экологический вестник Донбасса. – 2023. – № 9. – С. 47–55.
6. Крамаренко А.А., Коптева А.К., Лысенко И.Л. О формировании стока малых рек в условиях углеработок и о выборе рек-аналогов. // Экологический вестник Донбасса. – 2022. – № 7. – С. 37–50.
7. Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 1. Алгоритмы генерализации и осреднения. // Водные Ресурсы. – 2016а. – Т. 43. № 3. – С. 243–253. DOI: 10.7868/S0321059616030111.
8. Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 2. Результаты испытаний. // Водные Ресурсы. – 2016б. – Т. 43. № 5. – С. 467–475. DOI: 10.7868/S0321059616050096.
9. Погорелов А.В., Липилин Д.А., Яроцкая Е.В. Геоинформационный анализ современных изменений гидрографических характеристик речной сети на Азово-Кубанской равнине (бассейн реки Ея). // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. –161–179. DOI: 10.46698/VNC.2023.35.64.001.
10. Правила эксплуатации Исаковского гидроузла. Луганск: ОКП «Луганская областная топливно-энергетическая компания», 2003. – 17 с.
11. Свод правил по проектированию и строительству. СП 529.1325800.2023. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России, 2023. – 103 с.
12. Смирнова И.В., Вознюк Ю.С. Расчёт подземного стока в реку Белая гидрохимическими методами. // Экологический вестник Донбасса. – 2023. – № 9. – С. 41–46.
13. Beven K. Deep learning, hydrological processes and the uniqueness of place. // Hydrological Processes. – 2020. – Vol. 34. Issue 16. – pp. 3608–3613. DOI: 10.1002/hyp.13805.
14. Borsch S., Simonov Y., Khristoforov A., Semenova N., Koliy V., Ryseva E., Krovotyntsev V., Derugina V. Russian Rivers Streamflow Forecasting Using Hydrograph Extrapolation Method. // Hydrology. – 2022. – Vol. 9. DOI: 10.3390/hydrology9010001.
15. Daniel C. Pandas for everyone: Python data analysis, 2nd edition. Addison-Wesley Data & Analytics Series. – 2023. – 512 p.
16. Douglas C.M., Cheryl L.J., Kulahci M. Introduction to time series analysis and forecasting. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2015 – 671 p.
17. Deepali R.V., Gresha S. Bhatia python machine learning projects. – BPB Publications. – 2023. – 260 p.
18. Hancock J., Khoshgoftaar T. CatBoost for big data: an interdisciplinary review. // Journal of Big Data. – 2020. – Vol. 7(1). DOI: 10.1186/s40537-020-00369-8.
19. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A. CatBoost: unbiased boosting with categorical features. // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2018. – Vol. 31.
20. Stewart J. Python for Scientists, 3rd Edition. – Cambridge University Press. – 2023. – 228 p.
21. Trancart T., Acou A., De Oliveira E. Forecasting animal migration using SARIMAX: An efficient means of reducing silver eel mortality caused by turbines. // Endangered Species Research. – 2013. – Vol. 21(2). – pp. 181–190. DOI: 10.3354/esr00517.
22. Vennerod Ch.B., Kjaran A., Bugge E.S. Long short-term memory RNN. – 2021. – 16 p.

References

1. Artamonov N.V., Ivin E.A., Kurbatsky A.N., Fantazzini D. Introduction to time series analysis. Vologda: VolSC RAS. 2021. 134 p. (In Russ.)

2. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Forecasting the flow of Russian rivers. Moscow. Hydrometcenter of Russia. 2023. 200 p. (In Russ.)
3. Danilov A.M., Garkina I.A. Interpolation, approximation, optimization: analysis and synthesis of complex systems. Penza. PGUAS. 2014. 168 p. (In Russ.)
4. Dolgikh V.P., Rybalka S.V., Bobleva I.S. Short-term forecasting of the water regime of rivers and reservoirs by the Brown method. Environmental Bulletin of Donbass. 2024. No. 12. pp. 9-15. EDN AWPNZW. (In Russ.)
5. Kopteva A.K. On the impact of underground coal mining on the water resources of the Belaya River and the filling capacity of the Isakov reservoir in the Lugansk People's Republic. Environmental Bulletin of Donbass. 2023. No. 9. pp. 47–55. (In Russ.)
6. Kramarenko A.A., Kopteva A.K., Lysenko I.L. On the formation of the flow of small rivers in the conditions of coal mining and on the choice of analog rivers. Environmental Bulletin of Donbass. 2022. No. 7. pp. 37–50. (In Russ.)
7. Motovilov Yu.G. Hydrological modeling of river basins on various spatial scales. 1. Generalization and averaging algorithms. Water Resources. 2016a. Vol. 43. No. 3. pp. 243–253. DOI: 10.7868/S0321059616030111. (In Russ.)
8. Motovilov Yu.G. Hydrological modeling of river basins on various spatial scales. 2. Test results. Water Resources. 2016b. Vol. 43. No. 5. pp. 467–475. DOI: 10.7868/S0321059616050096. (In Russ.)
9. Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Yarotskaya E.V. GIS analysis of modern changes in the hydrographic characteristics of the river network in the Azov-Kuban plain (Eya river basin). Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 161–179. DOI: 10.46698/VNC.2023.35.64.001. (In Russ.)
10. Operating rules of the Isakov hydroelectric system. Lugansk. OKPD Lugansk Regional Fuel and Energy Company. 2003. 17 p. (In Russ.)
11. A rule book for design and construction. SP 529.1325800.2023. Determination of the main calculated hydrological characteristics. Moscow. State Construction Committee of Russia. 2023. 103 p. (In Russ.)
12. Smirnova I.V., Voznyuk Yu.S. Calculation of underground flow into the Belaya River by hydrochemical methods. Ecological Bulletin of Donbass. 2023. No. 9. pp. 41–46. (In Russ.)
13. Beven K. Deep learning, hydrological processes and the uniqueness of place. Hydrological Processes. 2020. Vol. 34. Issue 16. pp. 3608–3613. DOI: 10.1002/hyp.13805.
14. Borsch S., Simonov Y., Khristoforov A., Semenova N., Koliy V., Ryseva E., Krovotyntsev V., Derugina V. Russian Rivers Streamflow Forecasting Using Hydrograph Extrapolation Method. Hydrology. 2022. Vol. 9. DOI: 10.3390/hydrology9010001.
15. Daniel C. Pandas for everyone: Python data analysis, 2nd edition. Addison-Wesley Data & Analytics Series. 2023. 512 p.
16. Douglas C.M., Cheryl L.J., Kulahci M. Introduction to time series analysis and forecasting. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2015 – 671 p.
17. Deepali R.V., Gresha S. Bhatia python machine learning projects. BPB Publications. 2023. – 260 p.
18. Hancock J., Khoshgoftaar T. CatBoost for big data: an interdisciplinary review. Journal of Big Data. 2020. Vol. 7(1). DOI: 10.1186/s40537-020-00369-8.
19. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A. CatBoost: unbiased boosting with categorical features. Advances in Neural Information Processing Systems. 2018. Vol. 31.
20. Stewart J. Python for Scientists, 3rd Edition. Cambridge University Press. 2023. 228 p.
21. Trancart T., Acou A., De Oliveira E. Forecasting animal migration using SARIMAX: An efficient means of reducing silver eel mortality caused by turbines. Endangered Species Research. 2013. Vol. 21(2). pp. 181–190. DOI: 10.3354/esr00517.
22. Vennerod Ch.B., Kjarran A., Bugge E.S. Long short-term memory RNN. 2021. 16 p.

УДК 504.06(379.8)

DOI: 10.46698/VNC.2025.24.29.001

Оригинальная статья

Оптимизация рекреационного природопользования на Северо-Восточном Кавказе

Х.Ш. Забураева¹, Ч.Ш. Забураев¹, М.Б. Седиева¹, А.А. Шаипова^{1, 2}

¹ Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН,
Россия, 364020, г. Грозный, ул. В. Алиева, 21а,
e-mail: eveggne@mail.ru;

² Грозненский государственный нефтяной технический университет
им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, 100

Статья поступила: 25.06.2025, доработана: 18.08.2025, принята к публикации: 21.08.2025

Резюме: Рекреационное природопользование – одно из приоритетных направлений развития регионов Северо-Восточного Кавказа. Оптимизация рекреационного природопользования представляет собой **актуальную** задачу в связи с возрастающей антропогенной нагрузкой на уникальные горные ландшафты и необходимостью поиска оптимальных решений в удовлетворении рекреационных потребностей населения и сохранении биоразнообразия, поддержании экосистемных услуг. **Цель работы** – разработать оптимизационные модели сбалансированного (устойчивого) рекреационного природопользования в условиях Северо-Восточного Кавказа. **Методы работы:** системный, сравнительно-географический, исторический, демографический и этнокультурный анализ территории и статистическая обработка информации. **Результаты работы.** На основе анализа отечественных и зарубежных моделей оптимизации природопользования и учета региональных (природных, социально-экономических, этнокультурных) особенностей разработаны алгоритм оптимизации и концептуальная модель управления рекреационным природопользованием на Северо-Восточном Кавказе. Показано, что определению приоритетных стратегий развития должны предшествовать адекватная оценка туристско-рекреационного потенциала и экосистемных услуг, мониторинг рекреационных территорий, оценка рекреационной емкости, выявление проблем, лимитирующих рекреационное природопользование в регионе. Доказано, что управление сбалансированным рекреационным природопользованием возможно лишь при условии сохранения природных и природно-антропогенных ландшафтов, их способности к саморегуляции и самовосстановлению. В контексте устойчивого развития в предлагаемой модели в качестве базовых выделены экологические, экономические и социальные индикаторы. Показана важная роль крупных городов Северо-Восточного Кавказа в стратегическом планировании рекреационного природопользования как центров сосредоточения основных объектов социально-культурного наследия и инновационного потенциала. Сделаны выводы, что реализация предлагаемой модели, посредством достижения сбалансированности целей и показателей экономической эффективности и экологической безопасности рекреационного природопользования будет способствовать максимальной рентабельности туристско-рекреационной сферы и созданию оптимальных условий для развития внутреннего, въездного и международного туризма на Северо-Восточном Кавказе. Это будет иметь мультипликативный эффект для других сфер региональной экономики. Данная модель может быть применима и для других горных регионов России.

Ключевые слова: рекреационное природопользование, модель, оптимизация, устойчивое развитие, сбалансированное природопользование, горные регионы, рекреация, туризм.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-17-00218 «Экологический туризм и рекреационное природопользование на Северо-Восточном Кавказе»).

Для цитирования: Забураева Х.Ш., Забураев Ч.Ш., Седиева М.Б., Шаипова А.А. Оптимизация рекреационного природопользования на Северо-Восточном Кавказе. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 162-173. DOI: 10.46698/VNC.2025.24.29.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.24.29.001

Original paper

Optimization of recreational nature management in the North-Eastern Caucasus

Kh.Sh. Zaburaeva¹, Ch.Sh. Zaburaev¹, M.B. Sedieva¹, A.A. Shaipova^{1, 2}

¹ Kh.I. Ibragimov Complex Institute, Russian Academy of Sciences,
21a V. Alieva Str., Grozny 364020, Russian Federation,
e-mail: eveggne@mail.ru;

² Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov,
100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 364051, Russian Federation

Received: 25.06.2025, revised: 18.08.2025, accepted: 21.08.2025

Abstract: Recreational nature management is one of the priority areas for the development of the regions of the North-Eastern Caucasus. Optimization of recreational nature management is **the relevance** task, taking into account the increasing anthropogenic load on unique mountain landscapes and the need to find optimal solutions to meet the recreational needs of the population, preserve biodiversity and maintaining ecosystem services. **The aim** of the work is to develop optimization models of balanced (sustainable) recreational nature management in the conditions of the North-East Caucasus. **Research methods:** systematic, comparative geographical, historical, demographic and ethnocultural analysis of the territory and statistical processing of information. **Results.** Based on the analysis of Russian and foreign models for optimizing environmental management and taking into account regional (natural, socio-economic, ethnocultural) features, an optimization algorithm and a conceptual model for managing recreational environmental management in the North-East Caucasus have been developed. It is shown that in order to select priority development strategies, it is necessary to carry out an adequate assessment of tourist and recreational potential and ecosystem services, monitoring of recreational areas, assessment of recreational capacity, as well as identify problems holding back the development of recreational nature management in the region. It has been proven that the management of balanced recreational nature management is possible only if the natural and natural-anthropogenic landscapes are preserved, their ability to self-regulate and self-repair. In the context of sustainable development, the proposed model highlights environmental, economic and social indicators as basic indicators. The important role of large cities of the North-East Caucasus in strategic planning of recreational nature management as centers of concentration of the main objects of socio-cultural heritage and innovative potential is shown. It was concluded that the implementation of the proposed model, by achieving a balance of goals and indicators of economic efficiency and environmental safety of recreational nature management, will contribute to the maximum profitability of the tourist and recreational sector and the creation of optimal conditions for the development of Russian, inbound and international tourism in the North-East Caucasus. This will have a multiplier effect for other areas of the regional economy. This model may be applicable to other mountain regions of Russia.

Keywords: recreational nature management, model, optimization, sustainable development, balanced nature management, mountain regions, recreation, tourism.

Acknowledgment: The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 23-17-00218 "Ecological tourism and recreational nature management in the North-East Caucasus").

For citation: Zaburaeva Kh.Sh., Zaburaev Ch.Sh., Sedieva M.B., Shaipova A.A. Optimization of recreational nature management in the North-Eastern Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 162-173. DOI: 10.46698/VNC.2025.24.29.001

Введение

Исследованию теоретико-методологических аспектов оптимизации взаимодействия природы и общества посвящен широкий пласт отечественной и зарубежной научной литературы [Жердев, Зязина, 2003; Яковенко, Страчкова, 2019; Бадов и др., 2022; Архипова, 2025; Mangold et al., 2024; Ramirez-Marquez et al., 2024 и др.]. При этом многими исследователями основной акцент делается на биоцентрической модели отношения человека ко всем живым существам [Beery et al., 2023].

Ввиду повышенной уязвимости горных геозкосистем и наибольшей выраженности в них геодинамических процессов, в данной работе основной акцент делается на различных формах экологического туризма. Данный вид туризма характеризуется природоориентированной направленностью и осуществляется с целью обнаружения животного мира и культуры места назначения без нарушения целостности геозкосистем, стимулирования сохранения природно-ресурсного потенциала, охраны окружающей природной среды и стимулирования социально-экономического развития посещаемых территорий.

Мировая практика свидетельствует о возрастающей роли рекреационного природопользования (РПП) в контексте более устойчивого (сбалансированного) развития страны (региона). По оценкам Всемирной туристской организации (UNWTO) Россия обладает огромным потенциалом для развития экологического туризма [Севастьянов, Бочарникова, 2011]. Значительная часть его сосредоточена в горных регионах, которые в перспективе могут стать центрами развития экотуризма [Забуряева, Шаипова, 2025].

В их числе регионы Северо-Восточного Кавказа, обладающие большим экотуристским потенциалом, благодаря высокому биологическому и ландшафтному разнообразию, сети особо охраняемых природных территорий (ООПТ), этническому разнообразию и наличию объектов историко-культурного наследия. Необходимость рационального использования рекреационных ресурсов, предотвращения деградации горных ландшафтов и поиска новых научно-обоснованных подходов в решении проблем РПП на Северо-Восточном Кавказе предопределили актуальность данной работы.

Цель работы – разработка оптимизационных моделей сбалансированного (устойчивого) рекреационного природопользования в условиях Северо-Восточного Кавказа.

Материалы и методология исследования

Фактическим материалом для исследования послужили научно-методические разработки российских и зарубежных ученых в области устойчивого развития, управления природопользованием, охраны окружающей среды, официальные статистические данные Росстата, региональных министерств по туризму и культуре, нормативно-правовые акты, Стратегия экологической безопасности РФ на период до 2025 г., Основы государственной политики в области экологического развития РФ на период до 2030 года, Стратегия развития туризма на территории Северо-Кавказского федерального округа до 2035 года, стратегии развития туризма и социально-экономического развития Республики Дагестан, Чеченской Республики, Республики Ингушетия.

В работе применялись геосистемный, геоситуационный подходы и комплекс методов системного, сравнительно-географического, исторического, демографического, этнокультурного анализа территории и статистической обработки информации.

Результаты и обсуждение

Сущность оптимизации рекреационного природопользования

Принцип оптимизации природопользования играет ключевую роль в системе методообразующих принципов, реализация которого позволяет принимать наиболее целесообразные решения в сферах использования, охраны и воспроизводства природно-ресурсного потенциала, равнозначного использования геоэкологического и социально-экономического подходов [Забураева, 2020].

Достижение целей оптимизации РПП в горных регионах возможно лишь на основе анализа современного состояния рекреационных территорий и решения проблем РПП. С этой целью разработан алгоритм оценки и оптимизации РПП, который включает три этапа: оценочный, аналитический и стратегический (рис. 1).

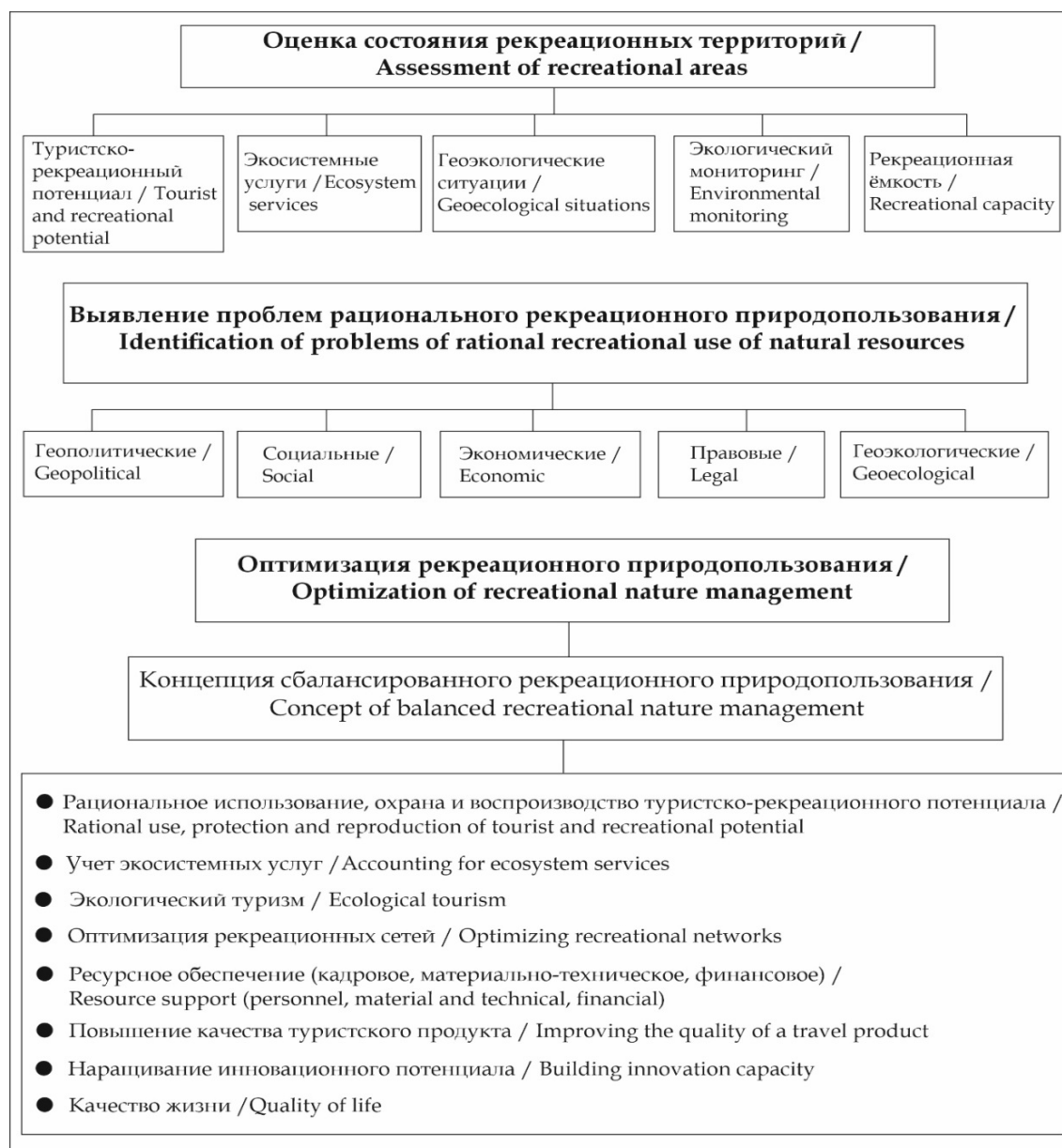


Рис. 1. Алгоритм оценки и оптимизации рекреационного природопользования на Северо-Восточном Кавказе /

Fig. 1. Algorithm for assessment and optimization of recreational nature management in the North-Eastern Caucasus

На начальном этапе предусмотрена адекватная оценка туристско-рекреационного потенциала и экосистемных услуг, формирующих основу для планирования РПП. Однако в условиях увеличивающейся антропогенной нагрузки на горные геосистемы в контексте обеспечения сбалансированного РПП недостаточно оценить потенциал, возможности для развития туризма и рекреации, поэтому на данном этапе важная роль также отводится комплексному мониторингу рекреационных территорий, который позволит выявить качественные и количественные изменения в функционировании и развитии основных компонентов природных и природно-антропогенных систем, оценить степень благоприятности геоэкологической ситуации туристской дестинации. Это послужит основой для дальнейшей количественной оценки рекреационной нагрузки на эти системы и определения их рекреационной емкости.

На практике рациональное РПП зачастую сдерживается проблемами правового, социального, экономического, геоэкологического и иного характера. Поэтому их выявление и анализ выступают неотъемлемой частью предлагаемого алгоритма. Заключительный этап предполагает определение приоритетных стратегий развития на основе разработки научно-обоснованных подходов к использованию, охране и воспроизводству туристско-рекреационного потенциала, что отвечает критериям ранее предложенной нами концепции сбалансированного природопользования [Забураева, 2020]. Особое внимание уделено оптимизации рекреационных сетей с целью удовлетворения потребностей коренного населения в санаторно-курортном лечении и развития лечебно-оздоровительного туризма на высоком уровне. Внедрение инновационных решений в планировании РПП будет способствовать повышению качества туристского продукта и конкурентоспособности туристских дестинаций.

Система управления рекреационным природопользованием

Сложность задачи планирования и управления сбалансированным (устойчивым) природопользованием обусловлена, с одной стороны, наличием множества связей и вовлеченных субъектов, что порождает конфликты интересов, а с другой стороны, необходимостью рационализации природопользования. Рекреационное природопользование рассматривается в качестве системы, в структуре которой выделяют типологию природопользования, ключевые направления и разновидности рекреации, оценку туристско-рекреационного потенциала и управление рекреационной деятельностью. Соответственно, необходим системный подход к планированию и управлению РПП [Оборин, 2011].

Анализ научной литературы в области РПП демонстрирует множество подходов к решению проблем природопользования. Однако практически все они признают, что оптимизация РПП – многоаспектная задача, требующая комплексного междисциплинарного подхода.

Международный опыт показывает, что устойчивое РПП должно базироваться на сохранении и рациональном использовании рекреационных ресурсов, обеспечении баланса спроса и предложения на различные виды туристских товаров и услуг [Ghasemi et al., 2024]. В работе [Arbolino et al., 2021] предложена модель многоцелевой оптимизации управления РПП, учитывающая экологические, социальные и экономические интересы общества. В работе [Neyret et al., 2023] также акцентируется внимание на необходимости разработки стратегий управления ландшафтами,

нацеленных на обеспечение одновременных выгод для различных заинтересованных сторон с конкурирующими интересами.

По мнению В.Н. Жердева и Т.В. Зязиной [Жердев, Зязина, 2003] сбалансированное управление РПП предполагает расширение существующей сети ООПТ, а также выделение рекреационных земель в особую категорию земель рекреационного назначения с последующими расчетами удельных показателей их кадастровой стоимости. На приграничных и трансграничных территориях рекомендуется утвердить «особый» статус трансграничных рекреационных пространств и территорий совместного РПП [Севастьянов, Бочарникова, 2011].

В работе [Атаев, Идрисов, 2023] в качестве перспективных направлений использования горных ландшафтов рекомендуется сохранение обширных пастбищ для овцеводства как одна из мер сохранения культурного наследия горцев и поддержания ландшафтного разнообразия Северо-Восточного Кавказа. Полагаем, в контексте развития РПП это будет иметь положительный эффект на развитие агротуризма и этнокультурного туризма.

Государственная политика в области управления РПП должна базироваться на ряде принципов, включая следующие: обеспечение устойчивого развития на основе учета экологических, экономических и социальных интересов; учет геоэкологических рисков; снижение негативного воздействия на окружающую природную среду; экологическое образование и просвещение населения и др. [Журавель, 2013].

Приоритетные направления инновационного развития РФ в области рационального природопользования и охраны окружающей среды закреплены в Конституции РФ, в федеральных законах, законах субъектов РФ, документах стратегического планирования, включая Стратегию экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 г., Основы государственной политики в области экологического развития РФ на период до 2030 г. и др.

Развитие туризма в исследуемых регионах осуществляется в соответствии с региональными стратегиями, которые отражают основные направления, цели и задачи развития туристской отрасли, обозначенные стратегией развития туризма на территории Северо-Кавказского федерального округа до 2035 года, а также общероссийской стратегией. В данных документах основной акцент сделан на увеличении туристского потока, создании и развитии современной туристской инфраструктуры, привлечении инвестиций.

Все обозначенные направления, безусловно, важны и необходимы для развития туристских территорий и туристских продуктов данных субъектов РФ на российском и международном рынках. Однако оценка перспектив долгосрочного развития туризма на горных территориях требует учета уникальных природных особенностей и разработки научно-обоснованного подхода к управлению и минимизации негативного воздействия на уязвимые горные экосистемы. Увеличение туристского потока должно осуществляться с учетом рекреационной емкости территории. На наш взгляд, здесь в определенной степени прослеживается изолированность экологической и экономической политики. В контексте сбалансированного природопользования следует усилить их интеграцию.

Кроме того, в стратегических документах по развитию рекреации и туризма экологический туризм рассматривается как один из перспективных видов туризма наряду с культурно-познавательным, лечебно-оздоровительным, горнолыжным,

спортивным и др. В соответствии с нашим подходом необходим планомерный переход на экологически ориентированные формы туризма, поскольку экотуризм может трактоваться как в узком, так и в широком смысле [Ostapchuk et al., 2024; Torsney et al., 2025]. Таким образом, моделирование сбалансированного РПП на Северо-Восточном Кавказе должно быть нацелено на рационализацию РПП, повышение качества жизни и создание условий для экологически безопасных (природоориентированных) видов туризма и рекреации за счет внутренних ресурсов: рекреационных, трудовых, научного потенциала и др. (рис. 2).

В стратегическом планировании РПП необходим учет рисков. К ним можно отнести социальные (конфликты интересов землепользователей, низкий уровень подготовки кадров в сфере туризма, слабая вовлеченность местного населения в туристско-рекреационную сферу и др.), геоэкологические (деградация горных ландшафтов, опасные природные явления и процессы, кризисные геоэкологические ситуации и др.), экономические (спад инвестиционной активности, износ туристско-рекреационной инфраструктуры и др.) риски (факторы), лимитирующие сбалансированное РПП.

Управление сбалансированным РПП в исследуемом регионе возможно лишь при условии сохранения природных и природно-антропогенных ландшафтов, их способности к саморегуляции и самовосстановлению и поддержания благоприятной окружающей среды. Ввиду этого в контексте устойчивого развития в качестве базовых индикаторов сбалансированного РПП нами выделены экологические, экономические и социальные критерии. Важная роль отводится системе поддержания экологического равновесия в регионе, нормативно-правовому регулированию туристической отрасли, внедрению экологически чистых (безопасных) технологий и производств в сфере туризма и рекреации, созданию замкнутых систем использования воды, очистки стоков и утилизации отходов. Это позволит в значительной степени сократить объемы отходов, особенно в труднодоступных горных районах. Особое внимание должно быть уделено созданию экологических троп и маршрутов.

Данная модель реализуема лишь при наличии трудоспособных высококвалифицированных кадров в сфере туризма. Непременным условием эффективного функционирования туристско-рекреационных комплексов является и вовлеченность в этот процесс местного населения как непосредственного участника, что положительно отразится на занятости населения и будет способствовать учету экологических ограничений в принятии и реализации управленческих решений.

Модель управления сбалансированным РПП должна включать экологический менеджмент и аудит в качестве неперенных условий для выявления базовых социально-экономико-экологических индикаторов. Это позволяет оценивать перспективы не только с позиций уровня рентабельности туристско-рекреационной сферы, но и поддержания экологического равновесия и повышения качества жизни населения.

В стратегическом планировании сбалансированного РПП важная роль отводится планированию развития крупных городов, в частности, в вопросах создания «зеленой» инфраструктуры [Halecki et al., 2023]. Крупные города Северо-Восточного Кавказа играют ключевую роль в развитии рекреации и туризма, поскольку в них сосредоточены основные объекты социально-культурного наследия и инновационный потенциал [Забураева и др., 2023, 2024].

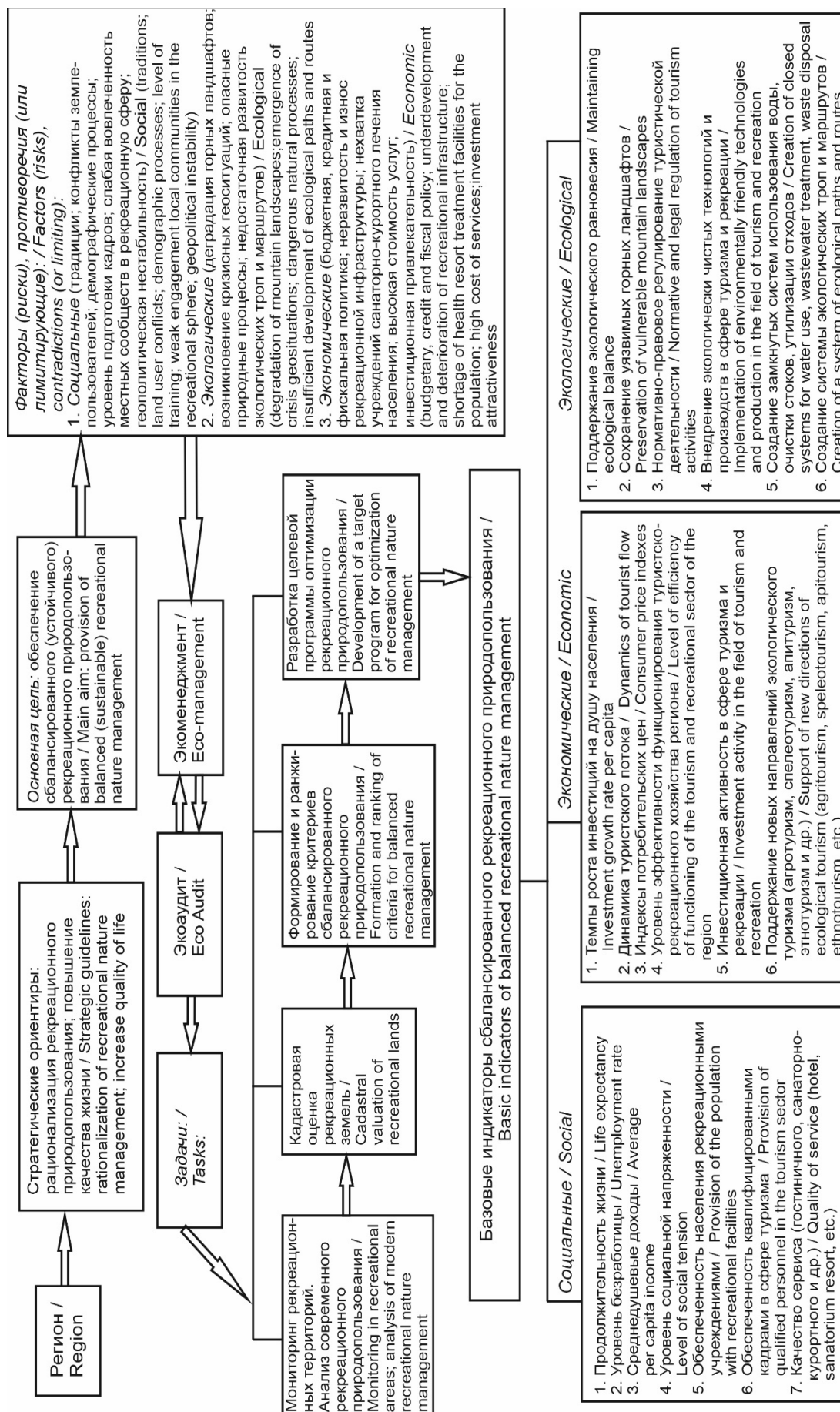


Рис. 2. Модель управления сбалансированным рекреационным природопользованием в условиях регионов Северо-Восточного Кавказа / Fig. 2. The management model of balanced recreational nature management in the North-Eastern Caucasus

Реализация предлагаемой модели призвана способствовать максимальной рентабельности туристско-рекреационной сферы и созданию оптимальных условий для развития внутреннего, въездного и международного туризма на Северо-Восточном Кавказе. Это будет иметь мультипликативный эффект и для других сфер региональной экономики.

Выводы

Рекреационное природопользование значится в числе приоритетных стратегических направлений развития регионов Северо-Восточного Кавказа. Наличие значительного туристско-рекреационного потенциала создает здесь предпосылки для развития широкого спектра разновидностей туристско-рекреационной деятельности. Однако в контексте более устойчивого развития исследуемых регионов будущее только за экологически безопасными (природоориентированными) видами туризма и рекреации. Это подтверждает необходимость перехода к регулируемому (сбалансированному) РПП.

В этой связи нами разработан алгоритм оценки и оптимизации РПП, включающий три этапа. Первый этап предполагает оценку туристско-рекреационного потенциала, проведение экологического мониторинга рекреационных территорий, выявление геоэкологических ситуаций и определение рекреационной емкости.

Второй этап рассчитан на выявление проблем (геополитических, социально-экономических, геоэкологических и др.), лимитирующих сбалансированное РПП. Реализация вышеперечисленных мер позволит на заключительном этапе разработать приоритетные стратегии оптимизации РПП, связанные с рациональным использованием, охраной и воспроизводством туристско-рекреационного потенциала, сохранением природных и культурных ландшафтов, развитием системы ООПТ, оптимизацией рекреационных сетей, модернизацией туристской инфраструктуры и наращиванием инновационного потенциала.

На основе анализа отечественных и зарубежных исследований в области РПП разработана концептуальная модель управления сбалансированным РПП на Северо-Восточном Кавказе, рассчитанная на рационализацию РПП, повышение качества жизни и создание условий для экологически безопасных (природоориентированных) видов туризма и рекреации за счет внутренних ресурсов: рекреационных, трудовых, научного потенциала и др.

На практике управление сбалансированным РПП и в целом реализация природоохранной стратегии зачастую усложняется конфликтом интересов экономического и экологического взаимодействия. Пространственное планирование исследуемых территорий и внедрение системы экологического менеджмента с учетом экосистемных услуг позволят применять новые эколого-экономические инструменты для достижения сбалансированности целей и показателей экономической эффективности и экологической безопасности РПП на Северо-Восточном Кавказе.

Предлагаемый в данной работе подход предполагает планомерный переход на экологически ориентированные формы туризма. Безусловно, это трудоемкий процесс, требующий значительных усилий, ресурсов и времени. Кроме того, как показывают современные исследования, экологические преимущества экотуризма не всегда гарантированы и часто зависят от эффективности управления, вовлеченности местного сообщества, экологического образования и воспитания населения

[Setiyono, Rachmawati, 2025]. Это подтверждает необходимость альтернативных или дополнительных подходов к охране природы, а также тщательного изучения потенциала экотуризма в более широком контексте устойчивого развития [Sisriany, Furuya, 2025].

Литература

1. Архипова О.Е., Мисиров С.А. Оценка рекреационной привлекательности Восточного Приазовья. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 1. – С. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2025.89.22.014.
2. Атаев З.В., Идрисов И.А. Природно-ресурсный потенциал горных ландшафтов Макажойской котловины (Северо-Восточный Кавказ). // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2023. – № 2. – С. 23–33. DOI: 10.31161/1995-0675-2023-17-2-23-33.
3. Бадов А.Д., Бадов О.А., Дзахова Л.Х., Бязрова Д.Б. Типология горных поселений Северной Осетии и основные направления их устойчивого развития. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 1. – С. 119–128. DOI: 10.46698/VNC.2022.95.96.009.
4. Жердев В.Н., Зязина Т.В. Методическое обеспечение сбалансированного управления рекреационным природопользованием. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. – 2003. – № 2. – С. 103–108.
5. Журавель В.Ф. Принципы управления природопользованием в рекреационном регионе. // Российский академический журнал. – 2013. – № 3(25). – С. 49–52.
6. Забураева Х.Ш. Концепция сбалансированного горного природопользования и ее значение в условиях Северо-Восточного Кавказа. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2020. – № 2(20). – С. 20–29. DOI: 10.25744/genb.2020.20.2.003.
7. Забураева Х.Ш., Забураев Ч.Ш., Седиева М.Б. Геологический и этнокультурный туризм: перспективы сопряженного развития на Северо-Восточном Кавказе. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 149–160. DOI: 10.46698/VNC.2023.14.67.012.
8. Забураева Х.Ш., Забураев Ч.Ш., Седиева М.Б., Шаипова А.А. Функциональное зонирование урбанизированных территорий Северо-Восточного Кавказа для рекреационных целей. // Russian Journal of Earth Sciences. – 2024. – Т. 24. ES3012. DOI: 10.2205/2024es000931.
9. Забураева Х.Ш., Шаипова А.А. Горные регионы России как центры развития экологического туризма. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 1. – С. 180–193. DOI: 10.46698/VNC.2025.26.88.015.
10. Оборин М.С. Туристско-рекреационное природопользование: основные направления изучения и анализа. // Географический вестник. – 2011. – № 1. – С. 68–73.
11. Севастьянов Д.В., Бочарникова М.В. Перспективы оптимизации рекреационного природопользования на приграничных территориях Сибири и Дальнего Востока. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7. Геология. География. – 2011. – № 2. – С. 111–121.
12. Яковенко И.М., Страчкова Н.В. Геомаркетинговые подходы к обоснованию системы регионального рекреационного природопользования. // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2019. – № 3. – С. 116–126.
13. Arbolino R., Boffardi R., De Simone L., Ioppolo G. Multi-objective optimization technique: A novel approach in tourism sustainability planning. // Journal of Environmental Management. – 2021. – Vol. 285. Art. No. 112016. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112016.
14. Beery T., Stahl Olafsson A., Gentin S., Maurer M., Stalhammar S. et al. Disconnection from nature: Expanding our understanding of human-nature relations. // People and Nature. – 2023. – Vol. 5. No. 2. – pp. 470–488. DOI: 10.1002/pan3.10451.
15. Ghasemi M., Gonzalez-Garcia A., Charrahy Z., Serrao-Neumann S. Utilizing supply-demand bundles in Nature-based Recreation offers insights into specific strategies for sustainable

tourism management. // *Science of the Total Environment*. – 2024. – Vol. 922. Art. No. 171185. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171185.

16. Halecki W., Stachura T., Fudala W., Stec A., Kubon S. Assessment and planning of green spaces in urban parks: A review. // *Sustainable Cities and Society*. – 2023. – Vol. 88. Art. No. 104280. DOI: 10.1016/j.scs.2022.104280.

17. Mangold M., Schwietering A., Zink J., Steinbauer M., Heurich M. The digitalization of outdoor recreation: Global perspectives on the opportunities and challenges for protected area management. // *Journal of Environmental Management*. – 2024. – Vol. 352. Art. No. 120108. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120108.

18. Neyret M., Peter S., Le Provost G. et al. Landscape management strategies for multifunctionality and social equity. // *Nature Sustainability*. 2023. – Vol. 6. – pp. 391–403. DOI: 10.1038/s41893-022-01045-w.

19. Ostapchuk I.O., Patsiuk V.S., Kazakov V.L. Ecological tourism in the industrial environment: A new vision. // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2024. – Vol. 1415. Art. No. 012107. DOI: 10.1088/1755-1315/1415/1/012107.

20. Ramirez-Marquez C., Posadas-Paredes T., Raya-Tapia A. Y., Ponce-Ortega J. M. Natural Resource Optimization and Sustainability in Society 5.0: A Comprehensive Review. // *Resources*. – 2024. – Vol. 13. Issue 2. Art. No. 19. DOI: 10.3390/resources13020019.

21. Setiyono, Rachmawati M.N. Land use optimization in Ngroto Hill, Pujon District, Malang Regency as an ecotourism destination. // *Journal of Applied Science and Engineering Management Research*. – 2025. – Vol. 1. No. 1. – pp. 64–71.

22. Sisriany S., Furuya K. Does ecotourism really benefit the environment? A trend analysis of forest cover loss in Indonesia. // *Land*. – 2025. – Vol. 14. No. 6. Art. No. 1237. DOI: 10.3390/land14061237.

23. Torsney A., O'Driscoll P., Buckley Y.M. Defining ecotourism for mainstream application and to support sustainable tourism governance. // *Ecological Solutions and Evidence*. – 2025. – Vol. 6. Issue 2. Art. No. e70050. DOI: 10.1002/2688-8319.70050.

References

1. Arkhipova O.E., Misirov S.A. Assessment of the recreational attractiveness of the Eastern Azov region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. 15(1): 166-179. DOI: 10.46698/VNC.2025.89.22.014. (In Russ.)

2. Ataev Z.V., Idrisov I.A. Natural resource potential of the Makazhoy basin mountain landscapes (North-Eastern Caucasus). *Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences*. 2023. No. 2. pp. 23–33. DOI: 10.31161/1995-0675-2023-17-2-23-33. (In Russ.)

3. Badov A.D., Badov O.A., Dzakhova L.Kh., Byazrova J.B. Typology of mountain settlements in North Ossetia and the main directions of their sustainable development. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 119–128. DOI: 10.46698/VNC.2022.95.96.009. (In Russ.)

4. Zherdev V.N., Zyazina T.V. Methodological support for balanced management of recreational nature management. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2003. No. 2. pp. 103–108. (In Russ.)

5. Zhuravel V.F. Principles of environmental management in the recreational region. *The Russian Academic Journal*. 2013. No. 3(25). pp. 49–52. (In Russ.)

6. Zaburaeva Kh.Sh. The balanced mountainous nature management concept and its meanings for the North-East Caucasus. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2020. No. 2(20). pp. 20–29. DOI: 10.25744/genb.2020.20.2.003. (In Russ.)

7. Zaburaeva Kh.Sh., Zaburaev Ch.Sh., Sedieva M.B. Geological and ethnocultural tourism: prospects for interrelated development in the North-Eastern Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13 No. 2. pp. 149–160. DOI: 10.46698/VNC.2023.14.67.012. (In Russ.)

8. Zaburaeva Kh.Sh., Zaburaev Ch.Sh., Sedieva M.B., Shaipova A.A. Functional zoning of urbanized territories of the North-Eastern Caucasus for recreational purposes. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024. Vol. 24. ES3012. DOI: 10.2205/2024es000931. (In Russ.)
9. Zaburaeva Kh.Sh., Shaipova A.A. Mountain regions of Russia as centers for the development of ecological tourism. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 1. pp. 180–193. DOI: 10.46698/VNC.2025.26.88.015. (In Russ.)
10. Oborin M.S. Natural management on touristic and recreational territories: basic directions of research and analysis. *Geographical Bulletin*. 2011. No. 1. pp. 68–73. (In Russ.)
11. Sevastyanov D.V., Bocharnikova M.V. Perspectives of recreational nature management optimization in frontier territories of Siberia and Far East. *Bulletin of St. Petersburg University. Series 7. Geology and Geography*. 2011. No. 2. pp. 111–121. (In Russ.)
12. Yakovenko I.M., Strachkova N.V. Geo-marketing approaches to substantiation of regional recreational nature management system. *Scientific Notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*. 2019. No. 3. pp. 116–126. (In Russ.)
13. Arbolino R., Boffardi R., De Simone L., Ioppolo G. Multi-objective optimization technique: A novel approach in tourism sustainability planning. *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 285. Art. No. 112016. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112016.
14. Beery T., Stahl Olafsson A., Gentin S., Maurer M., Stalhammar S. et al. Disconnection from nature: Expanding our understanding of human-nature relations. *People and Nature*. 2023. Vol. 5. No. 2. pp. 470–488. DOI: 10.1002/pan3.10451.
15. Ghasemi M., Gonzalez-Garcia A., Charrahy Z., Serrao-Neumann S. Utilizing supply-demand bundles in Nature-based Recreation offers insights into specific strategies for sustainable tourism management. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 922. Art. No. 171185. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171185.
16. Halecki W., Stachura T., Fudala W., Stec A., Kubon S. Assessment and planning of green spaces in urban parks: A review. *Sustainable Cities and Society*. 2023. Vol. 88. Art. No. 104280. DOI: 10.1016/j.scs.2022.104280.
17. Mangold M., Schwietering A., Zink J., Steinbauer M., Heurich M. The digitalization of outdoor recreation: Global perspectives on the opportunities and challenges for protected area management. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 352. Art. No. 120108. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120108.
18. Neyret M., Peter S., Le Provost G. et al. Landscape management strategies for multifunctionality and social equity. *Nature Sustainability*. 2023. Vol. 6. pp. 391–403. DOI: 10.1038/s41893-022-01045-w.
19. Ostapchuk I.O., Patsiuk V.S., Kazakov V.L. Ecological tourism in the industrial environment: A new vision. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1415. Art. No. 012107. DOI: 10.1088/1755-1315/1415/1/012107.
20. Ramirez-Marquez C., Posadas-Paredes T., Raya-Tapia A. Y., Ponce-Ortega J. M. Natural Resource Optimization and Sustainability in Society 5.0: A Comprehensive Review. *Resources*. 2024. Vol. 13. Issue 2. Art. No. 19. DOI: 10.3390/resources13020019.
21. Setiyono, Rachmawati M.N. Land use optimization in Ngroto Hill, Pujon District, Malang Regency as an ecotourism destination. *Journal of Applied Science and Engineering Management Research*. 2025. Vol. 1. No. 1: 64–71.
22. Sisriany S., Furuya K. Does ecotourism really benefit the environment? A trend analysis of forest cover loss in Indonesia. *Land*. 2025. Vol. 14. No. 6. Art. No. 1237. DOI: 10.3390/land14061237.
23. Torsney A., O'Driscoll P., Buckley Y.M. Defining ecotourism for mainstream application and to support sustainable tourism governance. *Ecological Solutions and Evidence*. 2025. Vol. 6. Issue 2. Art. No. e70050. DOI: 10.1002/2688-8319.70050.

УДК 504.453+504.4.054

DOI: 10.46698/VNC.2025.42.19.001

Оригинальная статья

Анализ вероятности метаморфизации ионного состава речных вод в бассейне Кубани

О.С. Решетняк¹, Р.С. Комаров^{1,2}

¹ Южный федеральный университет,
Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40,
e-mail: olgare1@mail.ru;

² Гидрохимический институт, Россия, 344090,
г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 198

Статья поступила: 20.05.2025, доработана: 02.09.2025, принята к публикации: 06.09.2025

Резюме: Актуальность работы. Происходящие изменения на водосборах рек Юга России оказывают влияние на процессы формирования ионного состава воды. В условиях антропогенного воздействия и климатических изменений может происходить метаморфизация ионного состава речных вод. Актуальность и важность изучения этого процесса не вызывает сомнения, поскольку позволяет выявлять источники загрязнения вод и решать региональные проблемы качества водных ресурсов. **Цель работы.** Выявить возможную метаморфизацию ионного состава речных вод в бассейне реки Кубани в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений. **Методы исследования.** Исследование проведено на основе многолетних гидрохимических данных государственной наблюдательной сети Росгидромета (1990–2020 гг.). На основе результатов перевода массовых концентраций в процентные в пересчете на количество вещества эквивалента выполнена классификация ионного состава речных вод. Выявлены региональные особенности ионного состава речных вод в бассейне Кубани и возможная метаморфизация за многолетний период. **Результаты работы.** Впервые для рек бассейна Кубани определены класс, группа и тип природных вод, проведена классификация ионного состава в многолетнем аспекте. Показано, что ионный состав воды по длине реки Кубани характеризуется разнообразием. Наблюдается изменение от наиболее простого состава с доминированием сульфатов и ионов кальция до более сложного – сульфатно-карбонатного класса кальциево-натриевой группы. Более постоянный ионный состав воды характерен для среднего течения реки с преобладанием сульфатов и ионов кальциево-натриевой группы. Основные притоки Кубани имеют однородный состав гидрокарбонатно-кальциевый второго типа (кроме р. Большой Зеленчук). Выделены основные направления метаморфизации ионного состава воды: для одних участков рек метаморфизация происходит в сторону стабилизации ионного состава, а для других – повышения разнообразия (смешанный состав). Метаморфизация речных вод в сторону изменения в анионном составе на отдельных участках Кубани проявляется в повышении доли сульфатов или в переходе к смешанному анионному составу. В большинстве случаев имеет место прямая метаморфизация. Наиболее вероятным последствием данного процесса может стать формирование повышенных или пониженных содержаний отдельных ионов, то есть гидрохимических аномалий.

Ключевые слова: бассейн Кубани, речные воды, ионный состав, метаморфизация природных вод, гидрохимические аномалии.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00366, <https://rscf.ru/project/24-27-00366/>.

Для цитирования: Решетняк О.С., Комаров Р.С. Анализ вероятности метаморфизации ионного состава речных вод в бассейне Кубани. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 174–186. DOI: 10.46698/VNC.2025.42.19.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.42.19.001

Original paper

Analysis of the probability of metamorphism of the ionic composition of river waters in the Kuban basin

O.S. Reshetnyak¹, **R.S. Komarov^{1,2}**

¹ Southern Federal University, 40 Zorge Str., Rostov-on-Don 344090, Russian Federation, e-mail: olgare1@mail.ru;

² Hydrochemical Institute, 198 Stachki Ave., Rostov-on-Don 344090, Russian Federation

Received: 20.05.2025, revised: 02.09.2025, accepted: 06.09.2025

Abstract: Relevance. The ongoing changes in the catchment areas of the rivers of the Russian South affect the processes of formation of the ionic composition of water. Under the conditions of anthropogenic impact and climate change, metamorphism of the ionic composition of river waters can occur. The relevance and importance of studying this process are beyond doubt, since it allows identifying sources of water pollution and solving regional problems of water resource quality. **Aim.** To identify the possible metamorphism of the ionic composition of river waters in the Kuban River basin under the conditions of anthropogenic impact and climate change. **Methods.** The study was carried out on the basis of long-term hydrochemical data of the state observation network of Roshydromet (1990-2020). Based on the results of converting mass concentrations into percentages in terms of the amount of equivalent substance, the ionic composition of river waters has been classified. Regional features of the ionic composition of river waters in the Kuban basin and possible metamorphism over a long-term period have been revealed. **Results.** For the first time, the class, group and type of natural waters have been determined for the rivers of the Kuban basin; the ionic composition has been classified in a long-term aspect. It has been shown that the ionic composition of water along the Kuban River is characterized by diversity. There is a change from the simplest with the dominance of sulfates and calcium ions to a more complex composition – sulfate-carbonate class of the calcium-sodium group. A more constant ionic composition of water in the middle reaches of the river with a predominance of sulfates and ions of the calcium-sodium group. The main tributaries of the Kuban have a homogeneous composition – hydrocarbonate-calcium of the second type (except for the Bolshoy Zelenchuk River). The main directions of metamorphization of the ionic composition of water are identified: for some sections of rivers, metamorphization occurs in the direction of stabilization of the ionic composition, and for others – diversity (mixed composition). Metamorphization of river waters in the direction of change in the anionic composition in certain sections of Kuban is manifested in an increase in the proportion of sulfates or in the transition to a mixed anionic composition. In most cases, direct metamorphization takes place. The most probable consequence of this process may be the formation of increased or decreased contents of individual ions, i.e. hydrochemical anomalies.

Keywords: Kuban basin, river waters, ionic composition, metamorphism of natural waters, hydrochemical anomalies.

Acknowledgements: The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation № 24-27-00366, <https://rscf.ru/project/24-27-00366/>.

For citation: Reshetnyak O.S., Komarov R.S. Analysis of the probability of metamorphism of the ionic composition of river waters in the Kuban basin. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 174-186. DOI: 10.46698/VNC.2025.42.19.001

Введение

На водосборах крупных рек европейской части России под влиянием антропогенной деятельности и изменений климата в последние десятилетия уже произошли существенные изменения в водных экосистемах. Многолетняя интенсивная хозяйственная деятельность привела к истощению водных ресурсов, особенно в южных районах России, а поступление широкого спектра органических и неорганических веществ в речные экосистемы может привести к техногенной трансформации химического состава воды и ухудшению ее качества [Никаноров, Брызгалов, 2006; Диффузное загрязнение ..., 2020].

Аналогичные процессы происходят на водосборах рек по всему миру, где под воздействием естественных и техногенных факторов наблюдаются существенные изменения химического состава воды, ионного стока рек, нарушаются естественные «солевые циклы», что обуславливает засоление пресных вод [Kaushal et al., 2023; Wu et al., 2021], изменяются естественные процессы выветривания горных пород [Lechuga-Crespo et al., 2020; Liu, Han, 2020], увеличивается вынос веществ с речным стоком вследствие климатических изменений [Gong et al., 2023]. В работе [Wang et al., 2025] показано, что выветривание карбонатов и силикатов является основным контролирующим фактором для процесса эволюции (метаморфизации) поверхностных вод. Сильное испарение приводит к значительным различиям в концентрациях ионов, что проявляется как низкими содержаниями ионов в водах в горных районах, так и высокими – в равнинных районах. И все эти процессы способствуют метаморфизации природных вод.

Как было показано ранее [Даниленко и др., 2020; Решетняк, 2023], одной из предпосылок метаморфизации природных (речных) вод является активная хозяйственная деятельность на водосборе, приводящая к значительным изменениям в ионном составе воды. Может происходить увеличение минерализации воды (для южных рек за счет испарения, для северных – за счет сброса сточных вод предприятий и т.п.), смещение показателя кислотности воды, изменение соотношения ионов в воде за счет повышения содержания отдельных компонентов и др. Таким образом, происходит метаморфизация природных вод, которая характеризуется устойчивыми изменениями в химическом составе воды.

Изначально процесс метаморфизации рассматривался как природный процесс «направленного изменения химического состава воды под действием физико-географических условий» [Никаноров, 2008]. Однако в современных условиях антропогенного воздействия наблюдается усиление процессов техногенной метаморфизации природных вод (в том числе и поверхностных, речных и др.), что детально рассмотрено в работах Е. П. Янина на примере рек европейской части России и в других исследованиях [Янин, 1983, 2006; Мукашева, Лопарева, 2013; Даниленко и др., 2020]. С наибольшей вероятностью процесс природной метаморфизации воды будет протекать в зонах с засушливым климатом, а техногенной метаморфизации – в высокоурбанизированных районах с развитой промышленностью и сельскохозяйственным производством.

Техногенная метаморфизация речных вод чаще всего связана с полным преобразованием гидрохимического режима в части изменения соотношения главных ионов, увеличения содержания биогенных элементов, органического вещества и усиления процесса эвтрофирования водоема, а также с появлением в воде ксенобиотиков, значительно ухудшающих качество воды [Янин, 2006]. При значительных изменениях в химическом составе воды происходит преобразование и донных от-

ложений, формируются так называемые «техногенные илы», обогащенные различными металлами [Янин, 2006; Закруткин, Решетняк, 2023], что соответственно в целом ухудшает экологическое состояние водных экосистем и усиливает экологические риски [Teranosyan et al., 2024].

В работе [Андрулиони и др., 2022] на примере реки Сырдарьи показано, что происходит рост концентрации сульфатов и трансформация стока, а наблюдаемая «метаморфизация ионного состава вод отдельных водоемов продолжается до настоящего времени и влечет за собой изменения физических свойств воды, таких как плотность, соленость».

Основным антропогенным фактором, вызывающим процесс метаморфизации природных вод в южных регионах (в бассейне оз. Балхаш, Малого Арала, рек Сырдарьи и Илека), является орошаемое земледелие и поступление возвратных вод с полей орошения [Мукашева, Лопарева, 2013]. Здесь происходит наложение природных факторов, способствующих засолению речных вод (повышенное испарение воды, жаркий климат), и антропогенной деятельности человека.

Антропогенные изменения влияют не только на состав воды, они воздействуют в целом на речные ландшафты в различных масштабах, что, в свою очередь, влияет на режим речного стока и качество воды, снижая экосистемные функции речных систем [Ekka et al., 2020].

Таким образом, представленные выше примеры обуславливают актуальность и важность изучения процесса метаморфизации природных вод. Необходимо не только знать источники загрязнения природных вод, но и понимать процессы, протекающие в водной среде (такие, как обменная адсорбция, реакции осаждения и кристаллизации, окислительно-восстановительные реакции, смешение вод разного состава и др.). Это позволит решать не только региональные проблемы трансформации состава природных вод и качества воды рек, но и рассматривать глобальные геохимические потоки и закономерности формирования ионного состава природных вод.

В данном контексте особенно актуальной является **цель нашего исследования** – выявить возможную метаморфизацию ионного состава речных вод в бассейне Кубани в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений за многолетний период.

Материалы и методы исследования

Исследование проведено на основе анализа и обобщения многолетних гидрохимических данных (1990–2020 гг.) Государственной наблюдательной сети (ГНС) Росгидромета, характеризующих содержание макрокомпонентов в воде рек бассейна Кубани (главных ионов: хлоридов, сульфатов, гидрокарбонатов, ионов кальция, магния, суммы ионов натрия и калия) (<https://gidrohim.com>). Авторами выполнены сбор и анализ первичных данных, перевод массовых концентраций в процентные в пересчете на количество вещества эквивалента для каждого иона и далее полученная информация проанализирована.

Объекты исследования: речные участки по длине реки Кубани в пунктах наблюдений: г. Невинномысск, г. Армавир, г. Кропоткин, ст-ца Ладожская, г. Краснодар, х. Тиховский, а также отдельные участки основных притоков Кубани: р. Большой Зеленчук – выше г. Невинномысск; р. Лаба – г. Лабинск, х. Догужиев; р. Белая – п. Гузерипль, г. Майкоп, а. Адамий; р. Пшеха – г. Апшеронск; р. Пшиш – г. Хадыженск, х. Фокин; р. Псекупс – г. Горячий Ключ; р. Афипис – ст-ца Смоленская; р. Абин –

г. Абинск; р. Адагум – г. Крымск. На некоторых пунктах наблюдений были рассмотрены створы выше и ниже города. Таким образом, в исследовании использованы данные по 19 пунктам наблюдений (по 23 створам) на 10 реках бассейна Кубани (рис. 1).

Разработка картосхем осуществлялась с помощью свободно распространяемой геоинформационной системы QGIS 3.10 (по наборам данных OpenStreetMap и Shuttle Radar Topography Mission) и компьютерной программы для редактирования пространственных данных SAGA GIS 2.3.2.

Методика исследования

Для оценки возможной (природной или техногенной) метаморфизации ионного состава речных вод необходимо провести классификацию ионного состава воды по классификации О.А. Алекина. В основе классификации лежат два принципа: о доминировании ионов в составе воды и учет соотношения ионов [Алекин, 1970].

Для исследуемых участков рек бассейна Кубани выполнен перевод всех значенных массовых концентраций в процентные в пересчете на количество вещества эквивалента для каждого иона за каждый год многолетнего периода. Далее определен класс (по доминирующему аниону), группа (по доминирующему катиону) и тип природных вод (по соотношению ионов) за каждый год периода исследования и за определенные периоды. На основе полученных данных классификации ионного состава речных вод определяется направленность процесса метаморфизации или стабильность ионного состава воды.

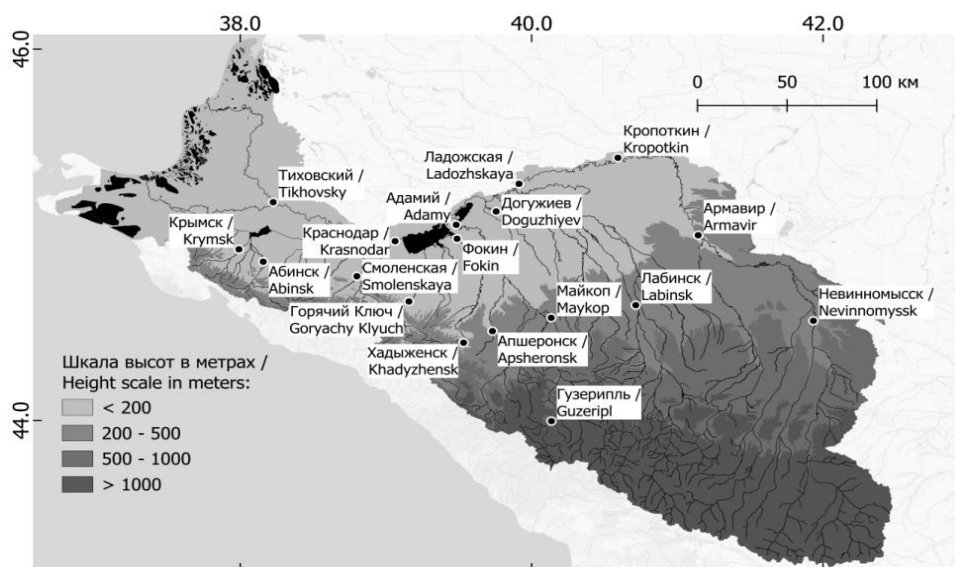


Рис. 1. Расположение пунктов наблюдений и участков в бассейне Кубани (составлено авторами) /

Fig. 1. Location of observation points and sites in the Kuban basin (compiled by the authors)

Гипотеза нашего исследования заключалась в следующем: при отсутствии значимого антропогенного воздействия не должно наблюдаться значительных изменений в ионном составе воды (то есть не меняется класс, группа и тип речных вод в бассейне Кубани). При устойчивых изменениях в ионном составе воды рек в многолетнем аспекте можно говорить о наличии метаморфизации [Решетняк, 2023]. При этом установление характера метаморфизации – природная или техногенная – требует дополнительных исследований.

Результаты и их обсуждение

В пределах речного бассейна Кубани абсолютные значения ионного стока изменяются в широких пределах (до 4673 тыс. т/год), достигая наибольших значений в нижнем течении Кубани, Лабы и Белой [Комаров, Решетняк, 2024]. В пространственном распределении ионного стока выявлена неоднородность интенсивности выноса ионов в пределах водосбора р. Кубани, обусловленная совокупным влиянием природных и техногенных факторов.

В динамике для исследуемых участков рек в многолетнем аспекте формируется убывающий тренд изменчивости ионного стока, но статистически значимыми тенденциями характеризуются только отдельные участки рек (р. Кубань – г. Краснодар, рук. Протока – г. Славянск-на-Кубани, рук. Протока – х. Слободка, р. Пшиш – г. Хадыженск и р. Псекупс – г. Горячий Ключ).

Обобщенная характеристика ионного состава воды по классификации О. А. Алекаина для участков по длине реки Кубани представлена в таблице 1, для участков изучаемых основных притоков Кубани – в таблице 2.

Таблица 1 / Table 1

**Классификация ионного состава воды по длине реки Кубани
(обобщение за 1990–2020 гг.) /
Classification of the ionic composition of water along the length of the Kuban River
(summary for 1990–2020)**

№	Пункт наблюдений / Observation point	Створ / Site	Класс / Class	Группа / Group	Тип / Type
1	г. Невинномысск / Nevinnomyssk	выше города / above the city	S (55 %)*	Ca (65 %)	II (87 %)
			SC (36 %)	CaNa (23 %)	
		ниже города / below the city	S (87 %)	CaNa (52 %)	II (97 %)
				Ca (36 %)	
2	г. Армавир / Armavir	выше города / above the city	S (97 %)	NaCa (32 %)	II (100 %)
				CaNa (29 %)	
		ниже города / below the city	S (97 %)	CaNa (52 %)	II (97 %)
				Ca (32 %)	
3	г. Кропоткин / Kropotkin	выше города / above the city	S (100 %)	CaNa (48 %)	II (97 %)
				Ca (26 %)	
		ниже города / below the city	S (100 %)	CaNa (48 %)	II (100 %)
				NaCa (26 %)	
4	ст-ца Ладожская / Ladozhskaya	в черте ст-цы / within the village	S (100 %)	CaNa (42 %)	II (100 %)
				Ca и NaCa (по 23 %)	
5	г. Краснодар / Krasnodar	выше города / above the city	CS (42 %)	Ca (100 %)	II (97 %)
			C (32 %)		
		ниже города / below the city	CS (61 %)	Ca (97 %)	II (97 %)
			C (36 %)		
6	х. Тиховский / Tikhovsky	в черте хут. / within the village	SC (68 %)	Na (45 %)	II (97 %)
			CS и S (по 16 %)	Ca (23 %)	

Примечания: С – карбонатный, S – сульфатный, SC – сульфатно-карбонатный, CS – карбонатно-сульфатный класс; Ca – кальциевая, Na – натриевая, CaNa – кальциево-натриевая, NaCa – натриево-кальциевая группа; II – второй тип; *частота встречаемости показателя (класс, группа, тип) за период исследования. / Note: C – carbonate, S – sulfate, SC – sulfate-carbonate, CS – carbonate-sulfate class; Ca – calcium, Na – sodium, CaNa – calcium-sodium, NaCa – sodium-calcium group; II – the second type; *frequency of occurrence of the indicator (class, group, type) for the period research.

Анализ данных таблицы 1 показал, что ионный состав воды на исследуемых участках по длине реки Кубани характеризуется разнообразием. Состав изменяется от наиболее простого S_{Ca} – сульфатный класс кальциевая группа (в отдельные годы на участках у гг. Армавир, Кропоткин и др.) до более сложных составов SC_{CaNa} – сульфатно-карбонатный класс кальциево-натриевая группа (в районе г. Невинномысска). В целом же, можно отметить, что более постоянный ионный состав воды в среднем течении реки и соответствует он сульфатному классу кальциево-натриевой группы (S_{CaNa}). Тип речных вод (II) по соотношению концентраций катионов и анионов постоянен на протяжении всего течения Кубани.

В отличие от разнообразия ионного состава воды основной реки притоки имеют однородный состав гидрокарбонатно-кальциевый второго типа. Исключение составляет р. Большой Зеленчук, где более существенно содержание сульфатов в воде (табл. 2). Это связано, с развитием карста (и вымыванием гипса и известняков) в верхнем и среднем течении реки.

Таблица 2 / Table 2

**Классификация ионного состава воды притоков Кубани (обобщение за 1990–2020 гг.) /
Classification of the ionic composition of water in the tributaries of the Kuban
(summary for 1990–2020)**

№	Приток / Tributary	Пункт наблюдений / Observation point	Класс / Class	Группа / Group	Тип / Type
1	р. Большой Зеленчук / Bolshoy Zelenchuk River	г. Невинномысск / Nevinnomyssk	SC (42 %)* CS (29 %)	Ca (90 %)	II (97 %)
2	р. Лаба / Laba River	г. Лабинск / Labinsk	C (97 %)	Ca (100 %)	II (97 %)
3	р. Лаба / Laba River	х. Догужиев / Doguzhiyev	C (100 %)	Ca (100 %)	II (84 %)
4	р. Белая / Belaya River	п. Гузерипль / Guzeripl	C (100 %)	Ca (100 %)	II (65 %)
5	р. Белая / Belaya River	г. Майкоп / Maykop	C (100 %)	Ca (100 %)	II (77 %)
6	р. Белая / Belaya River	а. Адамий / Adamy	C (100 %)	Ca (100 %)	II (81 %)
7	р. Пшеха / Pshekha River	г. Апшеронск / Apsheronensk	C (100 %)	Ca (100 %)	II (68 %)
8	р. Пшиш / Pshish River	г. Хадыженск / Khadyzhensk	C (100 %)	Ca (100 %)	II (87 %)
9	р. Пшиш / Pshish River	х. Фокин / Fokin	C (100 %)	Ca (100 %)	II (65 %)
10	р. Псекупс / Psekups River	г. Горячий Ключ / Goryachy Klyuch	C (100 %)	Ca (100 %)	II (74 %)
11	р. Афипс / Afips River	ст-ца Смоленская / Smolenskaya	C (100 %)	Ca (100 %)	II (77 %)
12	р. Абин / Abin River	г. Абинск / Abinsk	C (100 %)	Ca (100 %)	II (52 %) III (26 %)
13	р. Адагум / Adagum River	г. Крымск / Krymsk	C (100 %)	Ca (100 %)	II (74 %)

Примечания: C – карбонатный, SC – сульфатно-карбонатный, CS – карбонатно-сульфатный класс; Ca – кальциевая группа; II – второй тип; *частота встречаемости показателя (класс, группа, тип) за период исследования. / Note: C – carbonate, SC – sulfate-carbonate, SS – carbonate-sulfate class; Ca – calcium, II – the second type; *frequency of occurrence of the indicator (class, group, type) for the period research.

Анализируя данные таблиц 1 и 2 можно ожидать, что в период с 1990 по 2020 гг. произошла метаморфизация ионного состава воды на следующих участках:

- в районе г. Невинномысска и х. Тиховского возможно была перестройка катионного и анионного состава речной воды;
- в пунктах наблюдений г. Армавира, г. Кропоткина и ст-цы Ладужской возможно была метаморфизация только катионного состава воды;
- в районе г. Краснодара и на участке притока р. Большой Зеленчук (выше г. Невинномысска) возможно были изменения в анионном составе воды.

Доказать или опровергнуть высказанные предположения можно на основе детального изучения изменчивости ионного состава на данных участках рек.

Стоит отметить, что из большого количества исследуемых участков рек бассейна Кубани (всего проанализированы данные по 23 створам, т.е. изучены 23 участка реки) всего на 6-ти из них выявлена вероятность метаморфизации ионного состава воды за многолетний период. Это составило 26 % в целом для бассейна, что можно считать допустимым.

Как было показано ранее [Решетняк, 2023] выявление метаморфизации ионного состава речных вод основывается на следующих положениях.

1. Возможны так называемые прямая (переход от гидрокарбонатного к сульфатному и далее к хлоридному классу) и обратная метаморфизация ионного состава воды, что объясняется растворимостью солей в природных водах.

2. Протеканию прямой метаморфизации способствуют процессы усиления аридизации климата, повышение миграционной активности ионов кальция, рост минерализации воды, а процессу обратной метаморфизации – увеличение количества атмосферных осадков и влажный климат (то есть факторы, способствующие усилению рассоления дренируемых горных пород), снижение минерализации и возрастание карбонатности воды [Никаноров, 2008].

3. Если в определенный период более чем в 50 % рассматриваемых лет вода характеризуется определенным классом и группой, то и ионный состав за весь этот период можно охарактеризовать данными классом и группой. Если доминирующий класс и группу не удастся выделить, то ионный состав рассматривается как смешанный [Решетняк, 2023].

С учетом этих положений и анализа изменчивости ионного состава воды за многолетний период можно выявить направленность метаморфизации природных вод (устойчивые тенденции смены класса, группы или типа) или ее отсутствие (стабильность ионного состава воды рек).

Для этого сначала установлены периоды, в которые можно выделить постоянные характеристики (класс и группу) природных вод, и проведено сравнение особенностей ионного состава воды исследуемых участков рек бассейна Кубани за выделенные условные периоды. Результаты сравнительного анализа приведены в таблице 3.

Анализируя выделенные особенности метаморфизации (табл. 3) ионного состава воды рек можно выделить основные тенденции, по которым протекает этот процесс. Для одних участков рек метаморфизация происходит в сторону стабилизации (постоянства) ионного состава, а для других – разнообразия (смешанный состав, без явного доминирования ионов). Так, например, на участках реки Кубани (г. Невинномысск (выше города), ст-ца Ладужская и х. Тиховский) отмечается стабилизация катионного состава с тенденцией выхода на доминирующее положение ионов кальция или натрия. При этом смена доминирующего катиона с кальция на натрий на участке Кубани у х. Тиховского является подтверждением протекающих процессов засоления водосборной территории в нижнем течении реки на фоне климатических изменений.

Для других участков, таких как р. Кубань – г. Краснодар (выше города) и р. Большой Зеленчук – г. Невинномысск (выше города), стабилизация происходит в анионном составе воды. Наблюдается метаморфизация с разнообразного анионного состава на постоянный: в первом случае идет смена доминирующего аниона на гидрокарбонат (С (50 %), СS (44 %)), а во втором – на сульфаты и гидрокарбонаты (SC (75 %)) (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

Характеристика метаморфизации ионного состава воды на участках рек бассейна Кубани / Characteristics of metamorphism of ionic composition of water in sections of rivers of the Kuban basin

№	Исследуемый участок реки / The research site on the river	Периоды (годы) / Periods (years)					
		1990–2000	2001–2002	2003–2005	2006–2007	2008–2012	2013–2020
1	р. Кубань – г. Невинномысск (выше города) / Kuban River – Nevinnomyssk (above the city)	Постоянство анионного состава: S (100 %) / Constancy of anionic composition: S (100 %)	Разнообразие анионного состава: SC (55 %)+C+S / Diversity of anionic composition: SC (55 %)+C+S				
		Разнообразие катионного состава: Ca (52 %)+CaNa+CaMg / Diversity of cationic composition: Ca (52 %)+CaNa+CaMg			Постоянство состава: Ca (100 %) / Constancy of composition: Ca (100 %)		
2	р. Кубань – г. Армавир (ниже города) / Kuban River – Armavir (below the city)	Постоянство катионного состава: CaNa (67 %) / Constancy of cationic composition: CaNa (67 %)			Разнообразие катионного состава: Ca (54 %)+CaNa (31 %) / Diversity of cationic composition: Ca (54 %)+CaNa (31 %)		
3	р. Кубань – ст-ца Ладожская / Kuban River – Ladozhskaya	Разнообразие катионного состава: NaCa (39 %)+CaNa (28 %) / Diversity of cationic composition: NaCa (39 %)+ CaNa (28 %)			Постоянство катионного состава: CaNa (62 %) / Constancy of cationic composition: CaNa (62 %)		
4	р. Кубань – г. Краснодар (выше города) / Kuban River – Krasnodar (above the city)	Разнообразие анионного состава: SC (46 %), CS (38 %) / Diversity of anionic composition: SC (46 %), CS (38 %)		Смена доминирующего аниона на гидрокарбонат: C (50 %), CS (44 %) / Change of dominant anion to bicarbonate: C (50 %), CS (44 %)			
5	р. Кубань – х. Тиховский (в черте хут.) / Kuban River – Tikhovsky (within the village)	Постоянство анионного состава: SC (75 %) / Constancy of anionic composition: SC (75 %)			Разнообразие: S (57 %)+SC (43 %) / Diversity: S (57 %)+ SC (43 %)		
		Разнообразие катионного состава: Ca (44 %)+CaNa (37 %) / Diversity of cationic composition: Ca (44 %)+CaNa (37 %)		Смена доминирующего катиона и постоянство состава: Na (93 %) / Change of the dominant cation and constancy of composition: Na (93 %)			
6	р. Большой Зеленчук – г. Невинномысск (выше города) / Bolshoy Zelenchuk River – Nevinnomyssk (above the city)	Разнообразие анионного состава: S (30 %), SC (30 %), CS (30 %) / Diversity of anionic composition: S (30 %), SC (30 %), CS (30 %)			Постоянство анионного состава: SC (75 %) / Constancy of anionic composition: SC (75 %)		

В качестве примера метаморфизации ионного состава в сторону формирования смешанного состава воды можно привести изменения в анионном составе на участках Кубани выше г. Невинномыска и у х. Тиховского. Здесь произошла трансформация состава воды, который ранее характеризовался доминированием сульфатов (75–100 %), в сторону разнообразия анионного состава.

Если проанализировать выделенные для каждого речного участка периоды и «переходные» годы, в которые воды характеризуются различными ионными составами, то можно отметить совпадение границ периодов 2012–2013 гг. в 3-х случаях и 2007–2008 гг. – в 2-х случаях. Таким образом, период с 2007 по 2012 годы можно назвать переходным в целом для водосборной территории, после которого окончательно произошла метаморфизация ионного состава речных вод на отдельных участках в бассейне Кубани. Этот период совпадает с началом длительного маловодного периода, который сейчас наблюдается для многих водосборов Юга европейской части России, в том числе и для бассейна Кубани.

В большинстве случаев имеет место прямая метаморфизация (переход от карбонатного класса к сульфатному), но на участке выше г. Краснодара происходит снижение разнообразия анионного состава, смена доминирующего аниона на гидрокарбонат, то есть идет переход от сульфатного класса к гидрокарбонатному (табл. 3). Скорее всего, такой процесс вызван влиянием Краснодарского водохранилища, за счет которого создается более влажный микроклимат, идет боковая проточность воды и усиливается вымывание карбонатных минералов из дренируемых пород.

Процесс техногенной метаморфизации речных вод обуславливает не только нарушение гидрохимического режима и засоление водных объектов, но и приводит к формированию техногенных илов [Янин, 2006] и гидрохимических аномалий, техногенных гидрохимических потоков в природных водах [Макаров, 2024].

Для уязвимых арктических экосистем даже незначительные изменения в ионном составе способствуют формированию аномальных концентраций, в том числе и по содержанию в воде сульфатов, гидрокарбонатов, реже ионов кальция и магния. Например, наличие гидрохимических аномалий по содержанию сульфатов в воде отдельных рек Кольского полуострова является подтверждением техногенной природы метаморфизации ионного состава воды этих рек, водосборы которых расположены в зоне влияния предприятий горно-металлургического комплекса. Для водосборов южных рек таких данных пока не установлено, что также определяет важность наших дальнейших исследований данной проблемы.

Выводы

На основе проведенного исследования получены следующие результаты.

1. Ионный состав воды по длине реки Кубани характеризуется разнообразием и изменяется от наиболее простого S_{Ca} – сульфатный класс кальциевая группа (на участках у гг. Армавира, Кропоткина и др.) до более сложных составов SC_{CaNa} – сульфатно-карбонатный класс кальциево-натриевая группа (г. Невинномысск). Более постоянный ионный состав воды характерен для среднего течения реки – сульфатный класс кальциево-натриевая группа II тип. Основные притоки Кубани имеют однородный состав гидрокарбонатно-кальциевый второго типа. Исключение составляет р. Большой Зеленчук, где более существенно содержание сульфатов в воде.

2. Впервые выделены основные направления метаморфизации ионного состава воды в бассейне Кубани: для одних участков рек метаморфизация происходит в сторону стабилизации ионного состава, а для других – разнообразия (формируется смешанный состав без явного доминирования ионов). Показано, что смена доминирующего катиона с кальция на натрий на участке р. Кубани у х. Тиховского является подтверждением процесса засоления водосборной территории в нижнем течении реки на фоне климатических изменений.

3. Метаморфизация речных вод в сторону изменения в анионном составе на отдельных участках Кубани проявляется в повышении доли сульфатов до 75–100 % или в переходе к смешанному анионному составу. В большинстве случаев имеет место прямая метаморфизация, то есть переход от карбонатного класса к сульфатному. На участке реки выше г. Краснодара происходит обратный процесс возрастания доминирования гидрокарбонатов, что, скорее всего, связано с влиянием Краснодарского водохранилища.

4. Процесс метаморфизации речных вод в сторону доминирования сульфатов может стать причиной формирования гидрохимических аномалий в воде по данному компоненту.

Результаты проведенных исследований могут быть в дальнейшем использованы при изучении гидролого-гидрохимических особенностей функционирования речных систем в бассейне Кубани, для оценки последствий хозяйственной деятельности на водосборе, что позволит повысить информативность оценки качества воды рек бассейна Кубани с учетом региональных особенностей ионного состава воды и возможных тенденций его трансформации.

Литература

1. Алекин О.А. Основы гидрохимии: учебное пособие. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 442 с.
2. Андрулиони Н.Ю., Завьялов П.О., Ижицкий А.С. Современная эволюция солевого состава остаточных бассейнов Аральского моря. // *Океанология*. – 2022. – Т. 62. № 1. – С. 1–17.
3. Даниленко А.О., Косменко Л.С., Решетняк О.С., Кондакова М.Ю. Предпосылки техногенной метаморфизации ионного состава воды р. Надым в условиях глобальных климатических изменений. // *Известия РАН. Серия Географическая*. – 2020. – № 1. – С. 127–137. DOI: 10.31857/S2587556620010069.
4. Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения. Коллективная монография под рук. В.И. Данилова-Данильяна. – М.: РАН, 2020. – 512 с.
5. Закруткин В.Е., Решетняк В.Н. Распределение железа и его минералов в речных отложениях Восточного Донбасса. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 85–98.
6. Комаров Р.С., Решетняк О.С. Пространственно-временная изменчивость ионного стока в бассейне р. Кубани. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2024. – Т. 14. № 3. – С. 191–203. DOI: 10.46698/q4491-7472-5566-w.
7. Макаров В.Н. Формирование техногенных гидрохимических потоков при разработке месторождений олова в арктических районах Якутии. // *Арктика: экология и экономика*. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 549–561. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-549-561.
8. Мукашева А.С., Лопарева Т.Я. Генетическая однородность ионно-солевого состава воды Балхаш-Илейского и Арало-Сырдарьинского бассейнов. // *Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство*. – 2013. – № 2. – С. 111–115.
9. Никаноров А.М. Гидрохимия: Учебник. изд. 3-е, дополненное. – Ростов-на-Дону: «НОК», 2008. – 461 с.

10. Никаноров А.М., Брызгалов В.А. Пресноводные экосистемы в импактных районах России. – Ростов-на-Дону: «НОК», 2006. – 275 с.
11. Решетняк О.С. Анализ вероятности метаморфизации ионного состава ультрапресных вод арктических рек России. // Арктика: экология и экономика. – 2023. – Т. 14. № 3. – С. 437–448. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-3-437-448.
12. Янин Е.П. Изменение химического состава и техногенная метаморфизация речных вод в промышленно-урбанизированных районах. // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. – 2006. – № 3. – С. 2–27.
13. Янин Е.П. Основные тенденции изменения геохимических черт водотоков и водоемов в антропогенных ландшафтах. // Динамика географических систем. – М.: Изд-во МГУ, 1983. – С. 13–14.
14. Ekka A., Pande S., Jiang Y., Zaag P. Anthropogenic modifications and river ecosystem services: A landscape perspective. // Water. – 2020. – Vol. 12. Art. No. 2706. DOI: 10.3390/w12102706.
15. Gong S., Bai X., Luo G., Li C., Wu L., Chen F., Ran C., Xi H., Zhang S. Climate change has enhanced the positive contribution of rock weathering to the major ions in riverine transport. // Global and Planetary Change. – 2023. – Vol. 228. Art. No. 104203. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2023.104203.
16. Kaushal S.S., Likens G.E., Mayer P.M., Shatkay R.R., Shelton S.A., Grant S.B. et al. The anthropogenic salt cycle. // Nature Reviews Earth & Environment. – 2023. – Vol. 4. – pp. 770–784. DOI: 10.1038/s43017-023-00485-y.
17. Lechuga-Crespo J.L., Sanchez-Perez J.M., Sauvage S., Hartmann J., Amiotte Suchet P., Probst J. L., Ruiz-Romera E. A model for evaluating continental chemical weathering from riverine transports of dissolved major elements at a global scale. // Global and Planetary Change. – 2020. – Vol. 192. Art. No. 103226. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2020.103226.
18. Liu J., Han G. Major ions and $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ in Jiulongjiang River water: Investigating the relationships between natural chemical weathering and human perturbations. // Science of the Total Environment. – 2020. – Vol. 724. Art. No. 138208. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138208.
19. Tepanosyan G., Poghosyan Z., Sahakyan L. Geochemical characterization of changes in the chemical composition of river sediments under the continuous anthropogenic influence of Yerevan, Armenia. // Environmental Pollution. – 2024. – Vol. 359. Art. No. 124553.
20. Wang H., Wu S., Xu J., Zhang L., Li K., Li J., Shu H. and Chu J. Study on the surface water chemical composition and water quality pollution characteristics of the Shiyang River Basin, China. // Hydrology. – 2025. – Vol. 12. Issue 6. Art. No. 132. DOI: 10.3390/hydrology12060132.
21. Wu J., Xu N., Wang, Y., Zhang W., Borthwick Alistair G.L., Ni J. Global syndromes induced by changes in solutes of the world's large rivers. // Nature Communications. – 2021. – Vol. 12. Art. No. 5940. DOI: 10.1038/s41467-021-26231-w.

References

1. Alekin O. A. Fundamentals of hydrochemistry: a textbook. Leningrad. Gidrometeoizdat. 1970. 442 p. (In Russ)
2. Andrulioni N.Yu., Zavyalov P.O., Izhitsky A.S. Modern evolution of the salt composition of the residual basins of the Aral Sea. Oceanology. 2022. Vol. 62. No.1. pp. 1–17. (In Russ)
3. Danilenko A.O., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S., Kondakova M.Yu. Prerequisites for technogenic metamorphism of the ionic composition of the Nadym River water under global climate change. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series. 2020. No. 1. pp. 127–137. DOI: 10.31857/S2587556620010069. (In Russ)
4. Diffuse pollution of water bodies: Problems and solutions. Collective monograph under the supervision of V.I. Danilov-Danilyan. Moscow. RAS 2020. 512 p. (In Russ)
5. Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N. Distribution of Iron and Its Minerals in River Sediments of the Eastern Donbass. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 85–98. (In Russ)

6. Komarov R.S., Reshetnyak O.S. Spatio-temporal variability of ionic runoff in the Kuban River basin. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 191–203. DOI: 10.46698/q4491-7472-5566-w. (In Russ)
7. Makarov V.N. Formation of technogenic hydrochemical flows during the development of tin deposits in the Arctic regions of Yakutia. *Arctic: Ecology and Economics*. 2024. -ol. 14. No. 4. pp. 549–561. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-549-561. (In Russ)
8. Mukasheva A.S., Lopareva T.Ya. Genetic homogeneity of ion-salt composition of water in the Balkhash-Ilei and Aral-Syrdarya basins. *Bulletin of ASTU. Series: Fisheries*. 2013. No. 2. pp. 111–115. (In Russ)
9. Nikanorov A. M. *Hydrochemistry: textbook*. 3rd ed., supplemented. Rostov-on-Don. NOK. 2008. 461 p. (In Russ)
10. Nikanorov A. M., Bryzgalo V. A. *Freshwater ecosystems in impact regions of Russia*. Rostov-on-Don. NOK. 2006. 275 p. (In Russ)
11. Reshetnyak O.S. Analysis of the probability of metamorphism of the ionic composition of ultra-fresh waters of Russian Arctic Rivers. *Arctic: Ecology and Economics*. 2023. Vol. 14. No. 3. pp. 437–448. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-3-437-448. (In Russ)
12. Yanin E.P. Changes in the chemical composition and technogenic metamorphosis of river waters in industrial and urbanized areas. *Scientific and Technical Aspects of Environmental Protection*. 2006. No. 3. pp. 2–27. (In Russ)
13. Yanin E.P. Main trends in changes in the geochemical features of watercourses and reservoirs in anthropogenic landscapes. *Dynamics of Geographical Systems*. Moscow. MSU. 1983. pp. 13–14. (In Russ)
14. Ekka A., Pande S., Jiang Y., Zaag P. Anthropogenic modifications and river ecosystem services: A landscape perspective. *Water*. 2020. Vol. 12. Art. No. 2706. DOI: 10.3390/w12102706.
15. Gong S., Bai X., Luo G., Li C., Wu L., Chen F., Ran C, Xi H., Zhang S. Climate change has enhanced the positive contribution of rock weathering to the major ions in riverine transport. *Global and Planetary Change*. 2023. Vol. 228. Art. No. 104203. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2023.104203.
16. Kaushal S.S., Likens G.E., Mayer P.M., Shatkay R.R., Shelton S.A., Grant S.B. et al. The anthropogenic salt cycle. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2023. Vol. 4. pp. 770–784. DOI: 10.1038/s43017-023-00485-y.
17. Lechuga-Crespo J.L., Sanchez-Perez J.M., Sauvage S., Hartmann J., Amiotte Suchet P., Probst J. L., Ruiz-Romera E. A model for evaluating continental chemical weathering from riverine transports of dissolved major elements at a global scale. *Global and Planetary Change*. 2020. Vol. 192. Art. No. 103226. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2020.103226.
18. Liu J., Han G. Major ions and $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ in Jiulongjiang River water: Investigating the relationships between natural chemical weathering and human perturbations. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 724. Art. No. 138208. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138208.
19. Tepanosyan G., Poghosyan Z., Sahakyan L. Geochemical characterization of changes in the chemical composition of river sediments under the continuous anthropogenic influence of Yerevan, Armenia. *Environmental Pollution*. 2024. Vol. 359. Art. No. 124553.
20. Wang H., Wu S., Xu J., Zhang L., Li K., Li J., Shu H. and Chu J. Study on the surface water chemical composition and water quality pollution characteristics of the Shiyang River Basin, China. *Hydrology*. 2025. Vol. 12. Issue 6. Art. No. 132. DOI: 10.3390/hydrology12060132.
21. Wu J., Xu N., Wang, Y., Zhang W., Borthwick Alistair G.L., Ni J. Global syndromes induced by changes in solutes of the world's large rivers. *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. Art. No. 5940. DOI: 10.1038/s41467-021-26231-w.

УДК 551.1:330.15

DOI: 10.46698/VNC.2025.97.20.001

Оригинальная статья

Объекты геологического наследия на Черноморском побережье Краснодарского края

З.А. Толоконникова 

Кубанский государственный университет,
Россия, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149,
e-mail: zzalatoi@yandex.ru

Статья поступила: 21.05.2025, доработана: 30.07.2025, принята к публикации: 01.08.2025

Резюме: Актуальность работы. В XXI веке объекты геологического наследия (ОГН или геосайты) повсеместно стали рассматриваться как основа геологического туризма. Последний объединяет в себе познавательный, экологический, научный, рекреационный и активный виды туризма. Это один из способов решения проблемы сохранения природных богатств в условиях антропогенного давления, что особенно актуально для курортов Юга России. **Цель исследования** – сравнительный геоконсервационный анализ наиболее аттрактивных участков Черноморского побережья. Для достижения цели решались две задачи: а) сравнительный анализ геосайтов в окрестностях городов-курортов Анапы, Геленджика, г. Новороссийска, б) обоснование геотуристической значимости ОГН в районе х. Бетты. Подобная работа важна для зарождения и становления организованного геологического туризма, фактически не развитого в Краснодарском крае РФ. **Методы.** Работа базируется на личных полевых наблюдениях, фотофиксации, коллекциях осадочных горных пород, данных из литературных источников. Для обсуждения полученных результатов использован комплексный подход, основанный на описательной методике и адаптированном SWOT-анализе. **Результаты.** В результате исследования флишевых отложений от г. Анапы до х. Бетты вдоль береговой линии Черного моря рассмотрены ОГН семи типов геологического наследия: структурно-геологического, стратиграфического, геоморфологического, гидролого-гидрогеологического, седиментационного, палеогеографического и неотектонического. Проанализированы геотуристические особенности известных геосайтов – скалы Парус, «Флиши», оз. Абрау, оз. Лиманчик, которые являются примерами как геоморфологического (скалы Парус), так и комплексного типов геонаследия. Показано, что окрестности Бетты обладают средним (региональным) геотуристическим потенциалом среди ОГН Черноморского побережья Северо-Западного Кавказа. Предлагаемый ОГН включает структурно-геологический, стратиграфический, геоморфологический, седиментационный, палеогеографический и неотектонический типы. **Выводы.** Проведен анализ наиболее интересных участков черноморского побережья от города-курорта Анапы до хутора Бетты в качестве геосайтов, потенциально привлекательных для геотуристов. Генерализованный Беттинский геосайт отличается компактным расположением, разнообразным комплексом геологических достопримечательностей, типичных для флишевой формации, круглогодичной доступностью и развитой инфраструктурой.

Ключевые слова: геонаследие, флиш, Северо-Западный Кавказ, Бетта, мел, палеоген, геотуризм.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках проекта № Н-24.1/1.

Для цитирования: Толоконникова З.А. Объекты геологического наследия на Черноморском побережье Краснодарского края. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 187-198. DOI: 10.46698/VNC.2025.97.20.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.97.20.001

Original paper

Geological heritage sites on the Black Sea coast of Krasnodar Krai

Z.A. Tolokonnikova 

Kuban State University, 149 Stavropolskaya Str., Krasnodar 350040, Russian Federation,
e-mail: zzalatoi@yandex.ru

Received: 21.05.2025, revised: 30.07.2025, accepted: 01.08.2025

Abstract: Relevance. Objects of geological heritage were widely considered as the bases for geological tourism in the XX century. It combines cognitive, ecological, scientific, recreational and active types of tourism. This is one of the ways to solve the problem of preserving natural resources in the conditions of anthropogenic pressure, which is especially important for resorts of the South of Russia. **Aim of the research** – comparative geoconservative analysis of the most attractive areas of the Black Sea coast. Two tasks were solved for achieve the aim: a) comparative analysis of geosites in the vicinity of resort cities Anapa, Gelendzhik, and Novorossiysk; b) substantiation of the geotouristic significance of geosites in Betta area. This work is important for the emergence and formation of organized geological tourism, which was not really developed in the Krasnodar Krai of the Russian Federation. **Methods.** The study is based on the personal field observations, photo fixation, collections of sedimentary rock, data from literary sources. An integrated approach based on a descriptive methodology and an adapted SWOT-analysis was used for discuss the results obtained. **Results.** Seven types of geoheritage has been established after result of the study of the flysch deposits from Anapa to Betta along coast line of Black Sea. There are structural-geological, stratigraphical, geomorphological, hydrological-hydrogeological, sedimentation, paleogeographical and neotectonical types. The geotouristic features of known geoheritage objects – Parus scaur, “Flyshes”, Abrau lake and Limanchik lake, which are examples as geomorphological (Parus scaur) as complex types of geoheritage. It is shown that the territory of Betta and its surroundings has medium geotouristic potential among geosites of the Black Sea coast of the North-Western Caucasus. The proposed geosite includes structural-geological, stratigraphical, geomorphological, sedimentation, paleogeographical and neotectonical types. **Conclusions.** The analysis of the most interesting areas from the Black Sea coast was carried out as geosites, which will be potentially attractive for geotourists. The generalized Betta geosite is different a compact location, diverse complex of geological landmarks, which are typical for flysch formation, year-round accessibility, and developed infrastructure.

Keywords: geoheritage, flysch, North-Western Caucasus, Betta, Cretaceous, Paleogene, geotourism.

Acknowledgments: *The research is carried out with the financial support of the Kuban Science Foundation in the framework project No. H-24.1/1.*

For citation: Tolokonnikova Z.A. Geological heritage sites on the Black Sea coast of Krasnodar Krai. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 187-198. DOI: 10.46698/VNC.2025.97.20.001

Введение

В конце XX столетия вышел в свет первый федеральный перечень уникальных геологических объектов [Геологические памятники ..., 1998]. Для территории Краснодарского края в нем кратко описывались геоморфологические памятники природы (например, Гуамское ущелье, Большая Азишская пещера, водопады на р. Тешебс) или комплексные (мыс Железный Рог, грязевой вулкан Ахтанизовская сопка). Расширенная информация по избранным геологическим памятникам Черноморского побережья приведена в путеводителях экскурсий [Афанасьев, 1992;

Лыгина, 2006; Барабошкин и др., 2012] или статьях [Рубан, 2014; Ruban, 2021]. В XXI веке объекты геологического наследия (ОГН или геосайты) повсеместно стали рассматриваться как основа геологического туризма [например, Kubalikova et al., 2022; Chlachula, Mychko, 2023; Yashalova, Ruban, 2024]. Последний объединяет в себе элементы познавательного, экологического, научного, рекреационного и активного видов туризма, являясь одним из способов решения проблемы сохранения природных богатств в условиях современного антропогенного давления. Это особенно актуально для курортов Юга России.

Цель работы – сравнительный геоконсервационный анализ наиболее аттрактивных участков Черноморского побережья Северо-Западного Кавказа. Достижение цели включало решение двух задач: а) сравнительный анализ геосайтов в окрестностях городов-курортов Анапы, Геленджика, г. Новороссийска, в) обоснование геотуристической значимости ОГН в районе х. Бетты. Подобная работа значима для зарождения и становления организованного геологического туризма, фактически не развитого в Краснодарском крае РФ.

Геологический очерк

Изученная территория сложена верхнемеловыми и нижнепалеогеновыми породами флишевой формации, перекрытыми четвертичными отложениями (рис. 1). Их образование происходило в альпийский этап формирования орогена, заложившегося в палеозое и изменяющегося до сих пор.

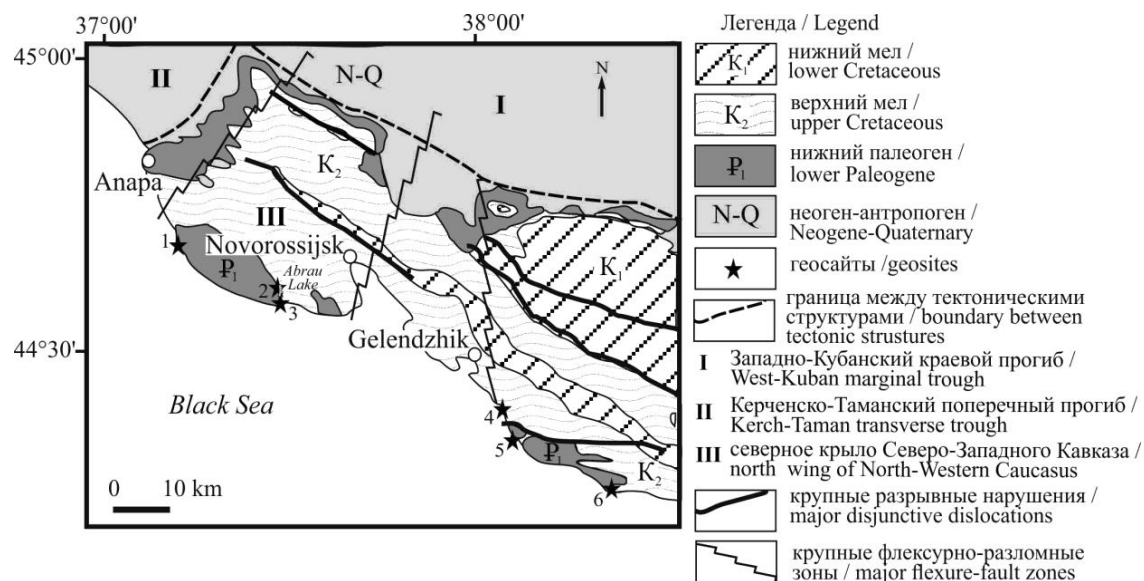


Рис. 1. Расположение геосайтов (основа по Маринину, Расцветаеву, [2008] с изменениями):

1 – Большой Утриш, 2 – Абрау, 3 – Лиманчик и Южная Озереевка,
4 – «Флиши», 5 – скала Парус, 6 – Бетта /

Fig. 1. Location of geosites (base by Marinin, Rasctvetaev, 2008 with changes):

1 – Bol'shoj Utrish, 2 – Abrau, 3 – Limanchik and Southern Ozereevka, 4 – "Flysches",
5 – Parus scaur, 6 – Betta

К концу мезозоя на северной периферии океана Неотетис существовали вулканические и островные дуги. Они разделяли мелководные карбонатные осадки Скифской платформы (южной окраины Лавразии) и задуговые бассейны Большекавказского окраинного моря [Афанасьев, 2004; Большой Кавказ ..., 2007]. На про-

тяжении мелового периода массы обломочного материала периодически поступали в акваторию, накапливаясь в Западно-Кавказском и Восточно-Кавказском флишевых бассейнах [Панов, 2013]. Основными источниками сноса являлась островная суша и Закавказский срединный массив. К концу эоцена произошло закрытие флишевых задуговых морских бассейнов. Земная кора подвергалась интенсивным складчато-надвиговым деформациям. Формирование горного сооружения Большого Кавказа на протяжении неогена–антропогена связано с продвижением Аравийской платформы в северном направлении, коллизией Евразийской плиты и мелких континентальных блоков распавшейся Гондваны [Большой Кавказ ..., 2007; Панов, 2013]. Глубоководные участки Неотетиса эволюционировали до современных акваторий Черного и Азовского морей.

В пределах изученной береговой зоны обнажаются кампанские, маастрихтские и датские цикличные толщи. Ограниченное распространение имеют турон-коньякские (натухайская свита) и сантонские (гениохская свита) отложения в виде мергелей, известняков, песчаников, алевролитов с линзами конгломератов и гравелитов [Лыгина, 2006]. Кампанские мергели, известняки, песчаники и алевролиты соответствуют ахейнской, пенайской, бединовской и куниковской свитам. Маастрихт сложен известняками, мергелями, песчаниками, с подчиненным значением глин и гравелитов общей мощностью более 2 км (свиты Мысхако, лихтеровская, васильевская и снегуровская). Датские флишевые толщи представлены песчаниками, аргиллитами, в меньшей степени глинами и анкеритами общей мощностью более 1 км (свиты Сукко, навагирская, кадошская/анапская и Цице). Турон-сантонские отложения тонкоритмичные (мощность ритмов 0,1–1,5 м), кампан-датские – крупноритмичные (мощность ритмов 0,5–2,5 м). Возраст местных стратиграфических подразделений обоснован фораминиферами [Государственная ..., 2021a, 2021b]. Макрофаунистические остатки практически отсутствуют, широко распространены ихнофоссилии. Пески, песчаники, глины, гравий, гальки, конгломераты плейстоценовых морских террас Черного моря несогласно лежат на палеоценовых отложениях [Несмеянов и др., 2021]. На рассматриваемой площади выделены позднечаудинская, криницкая (древнеэвксинская), пшадская (узулларская) и новоэвксинская террасы с региональными парастратотипами в окрестностях г. Геленджика.

Методы исследования

Статья базируется на личных наблюдениях, полевых работах и анализе опубликованных источников. Данные обработаны комплексным подходом с использованием сравнительного и SWOT анализов. Методика SWOT сосредоточена на комплексной оценке ОГН, возможности вовлечения их в геотуризм конкретной территории с учетом культуры, традиций, истории, биоразнообразия, существующей инфраструктуры. В современных работах [например, Mero et al., 2018; Herrera-Franco et al., 2020; Ruban et al., 2022] на базе SWOT определяется научная, образовательная и геотуристическая ценность геосайтов по ряду показателей, каждый из которых обладает конкретным весом. Однако единое мнение о перечне показателей и весе каждого из них отсутствует. В настоящей работе геотуристический потенциал геосайтов определялся на основе 15 критериев (см. Обсуждение), каждый из которых оценивался от 0 (отсутствует) до 5 (максимальное присутствие). В итоге находилась общая значимость (В – высокая, С – средняя, Н – низкая) для каждого ОГН в масштабе Краснодарского края.

Результаты

Черноморские берега от Анапы до Бетты – чередование клифов и пляжей. Полуостров Абрау, разделяющий Анапскую и Цемесскую (Новороссийскую) бухты – один из наиболее тектонически и сейсмически активных участков побережья, с наивысшей плотностью оползней на единицу площади. Самые крупные оползневые тела приурочены к зоне Утришского разлома в пределах заповедника «Утриш» [Крицкая и др., 2017; Миронюк, Ионов, 2019]. Они образуют геосайт Большого Утриша с четырьмя типами геонаследия (табл. 1). Сильно расчлененный рельеф полуострова – результат «сглаживания» экзогенными процессами последствий неоднократных восьмидесятибалльных землетрясений. Подпруживание речной долины Абрау обусловило формирование одноименного озера; снос обломочных масс в море – мысов Утриш, Утришок, аккумулятивного берега в с. Большой Утриш; колебания уровня моря – системы лиманов [Крицкая и др., 2017]. Помимо оползневого происхождения оз. Абрау рассматривается как реликт Черноморского бассейна. Геонаследие озера представлено гидрогеологическим, структурно-геологическим и палеогеографическим типами [Геологические памятники ..., 1998; Барабошкин и др., 2012; Ruban, 2021]. В 4 км южнее расположено оз. Лиманчик, отделенное от Черного моря баром. Это национальный геосайт с семью типами геонаследия (табл. 1) [Ruban, 2021]. В его окрестностях обнаружены ихнофоссилии, механоглифы, выделен опорный разрез лихтеровской свиты [Рубан, 2014; Барабошкин, Барабошкин, 2015]. Оба озера имеют статусы региональных ООПТ (<https://www.uooptkk.ru>). В районе с. Южная Озереевка сделана единственная находка двустворчатого моллюска [Алексеев и др., 2018]. Из-за близости расположения оз. Абрау, оз. Лиманчик и с. Южная Озереевка рассмотрены как единый геосайт (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Характерные особенности рассмотренных геосайтов / Characteristic features of described geosites

Геосайт / Geosite	Большой Утриш / Bol'shoj Utrish	Абрау, Лиманчик, Южная Озереевка / Abrau, Limanchik, Southern Ozereevka	«Флиши», скала Парус / «Flysches», Parus scaur	Бетта / Betta
Характеристика / Characteristic	Тип геонаследия / Type of geoheritage			
Геоморфологический / Geomorphological	+	+	+	+
Структурно-геологический / Structural-geological	+	+	+	+
Седиментационный / Sedimentation	+	+	+	+
Палеогеографический / Paleogeographical	+	+	+	+
Стратиграфический / Stratigraphical		+		+
Гидролого-гидрогеологический / Hydrologic-hydrogeological		+		
Неотектонический / Neotectonical		+	+	+
Форма / Form				
Естественное обнажение / Nature outcrop	+	+	+	+
Динамический объект / Dynamic object	+	+		
Туристическая инфраструктура / Tourist infrastructure				
Общественный транспорт / Public transport	+	+	+	+
Маршруты и площадки / Routes and platforms	+	+		+
Оснащение / Equipment	+			

В 10 км юго-восточнее Геленджика известен геологический памятник «Флиши» общей протяженностью около 11 км [Геологические памятники ..., 1998; Барабошкин и др., 2012]. Согласно (<https://www.uoortkk.ru>) с 2024 г. введен в состав памятника природы «Джанхотский бор сосны пицундской». На протяжении 3 км вдоль береговой линии от с. Дивноморское происходит смена кампанских отложений нерасчлененными турон-сантонскими. Перед с. Джанхот по тектоническому нарушению прослеживается контакт с навагирской свитой дания [Государственная..., 2021б]. В районе с. Джанхот встречаются кластические дайки. Далее до скалы Парус чередуются песчаники, алевролиты, глины свит Сукко, навагирской, кадошской и Цице. Для «Флишей» характерна смена общекавказского северо-западного простирания пород вплоть до юго-западного, вариация углов падения от 15° до 75° . По породам наблюдаются складчатые и разрывные дислокации, встречаются разнообразных ихнофоссилии [Барабошкин и др., 2012; Барабошкин, Барабошкин, 2015]. В целом, ОГН комплексного типа (табл. 1).

Скала Парус (координаты $44^{\circ}26'18.93''$ N, $38^{\circ}11'04.21''$ E) – памятник природы геоморфологического типа (<https://www.uoortkk.ru>). Прямоугольный песчаный останец $25 \times 20 \times 1$ м стоит в воде перпендикулярно береговой линии. Он образовался в результате избирательной абразии и выветривания флишевых толщ свиты Цице [Лыгина, 2006].

В 48 км от Геленджика, на протяжении 2 км северо-западнее устья р. Бетта обнажаются палеоценовые толщи (свиты Сукко и навагирская). По подошве песчаников навагирской свиты распространены *Thalassinoides* isp. (рис. 2Д), экзоглифы в виде волновых знаков (рис. 2Е). Песчаники характеризуются градационной, косой, конволютной слоистостью. Нижнепалеоценовые толщи местами дислоцированы. Например, в 600 м западнее устья р. Бетта (координаты $44^{\circ}22'08.29''$ N, $38^{\circ}23'11.76''$ E) крупная синклинальная складка (рис. 2Б). Складка наклонная, асимметричная, южное крыло пологое, северное – субвертикальное (угол падения 85°) с опрокинутым залеганием пород [Лыгина, 2006; Барабошкин и др., 2012]. В районе щели Культурной на берегу прослеживается тело оползня.

Юго-восточнее устья р. Бетта палеоценовый флиш сменяется маастрихтским. Граница мела-палеоцена перекрыта коллювиально-делювиальными отложениями и частично задернована. Нормальное залегание слоев снегуровской свиты нарушено флексурами, складками или разрывными нарушениями с малой амплитудой смещения. Встречаются кальцитовые прослойки, зеркала скольжения. В районе Голубой лагуны снегуровские слои неоднократно меняют характер залегания (моноклиальный/горизонтальный), а также несогласно перекрываются конгломератами и песками криничкой (плейстоценовой) морской террасы (рис. 2А). По подошве пластов песчаников и внутри известковых прослоев встречаются ихнофоссилии. Наиболее распространены *Ophiomorpha* isp. (рис. 2Г), *Skolithos* isp. (рис. 2Ж), *Fucusopsis* isp., *Chondrites* isp. Ихнокомплексы Бетты сходны с ихнокомплексами Южной Озереевки, «Флишей». Ихнофоссилии значимы для палеогеографических, палеоэкологических реконструкций, расчленения разрезов [Микулаш, Дронов, 2006].

Бетта предлагается как круглогодично доступный комплексный геосайт (табл. 1). Уникальность заключается в обнаженности флишевых толщ, измененных неотектоническими процессами, выветриванием и поверхностными водами в условиях гумидного климата. Вдоль дороги Криница–Бетта (в районе Культурной щели) располагается региональный парастратотип узунларской (пшадской) морской террасы (средний плейстоцен) [Лыгина, 2006; Несмеянов и др., 2021].

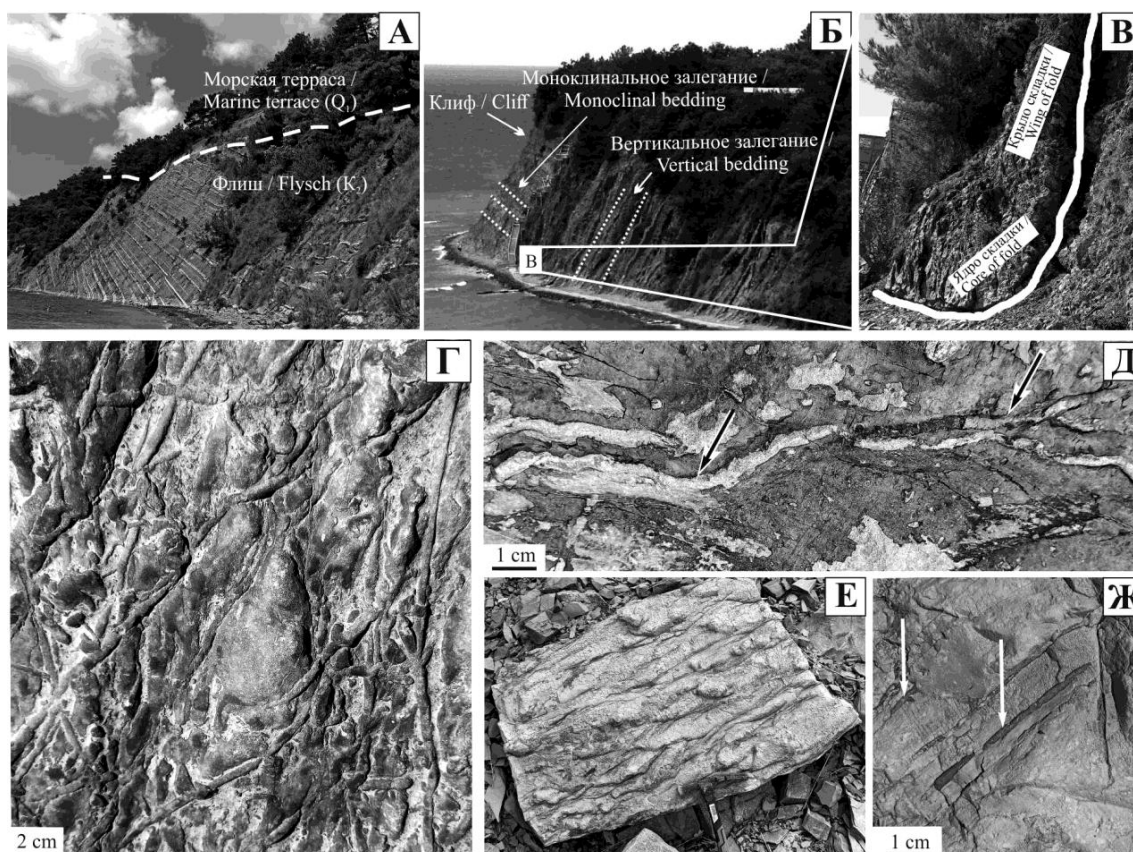


Рис. 2. Геотуристические объекты окрестностей х. Бетты:

А – угловое и стратиграфическое несогласие между снегуровской свитой и криницкой террасой (координаты 44°22'32.87'' N, 38°24'40.85'' E); Б – изменение залегания пластов палеоценового флиша (в 600 м западнее устья р. Бетта); В – синклиальная складка;

Г – поверхность биотурбированного песчаника (преимущественно *Ophiomorpha isp.*), маастрихт, снегуровская свита; Д – *Thalassinoides isp.*, палеоцен, навагирская свита;

Е – рябь течения на подошве слоя песчаника, даний, навагирская свита;

Ж – *Skolithos isp.*, маастрихт, снегуровская свита /

Fig. 2. Geotourist objects from neighborhood of Betta: A – angular and stratigraphical discordance between Snegurovsk suite and Krinitza terrace (coordinates 44°22'32.87'' N, 38°24'40.85'' E); Б – change in the nature of layers, Paleocene flysch (600 m west of the mouth of Betta); В – syncline fold; Г – surface of bioturbated sandstone (predominantly *Ophiomorpha isp.*), Maastrichtian, Snegurovsk suite; Д – *Thalassinoides isp.*, Paleocene, Navagir suite; Е – ripple marks on the bottom of the sandstone bed, Danian, Navagir suite; Ж – *Skolithos isp.*, Maastrichtian, Snegurovsk suite

Обсуждение

При движении вдоль береговой линии от Анапы до Бетты можно познакомиться с ОГН, представляющими семь типов геонаследия (табл. 1). Все они демонстрируют флишевые отложения, накопившиеся на дне океана Неотетиса на рубеже мезозоя–кайнозоя. Объекты естественного происхождения, подвержены активной абразии, эрозии гравитационного и водного генезиса. Последствия активности экзогенных процессов выражены промоинами, пролювиальными и коллювиальными конусами, оползнями, клифами, бенчами. Все геосайты тяготеют к курортным городам, отличаясь степенью развития инфраструктуры (отсутствием/наличием асфальтированных дорог, туристических троп, мест размещения, связи и пр.). Проведенный сравнительный анализ (табл. 2) показал средний геотуристический потенциал – у

Большой Утриша, «Флишей» и скалы Парус, Бетты, высокий – оз. Абрау вместе с Южной Озереевкой и оз. Лиманчик.

Таблица 2 / Table 2

**Сравнение геосайтов Черноморского побережья SWOT-анализом /
Comparison of geosites of the Black Sea coast by SWOT-analysis**

п/п	Критерий / Criterion	Геосайт / Geosite			
		Большой Утриш / Bol'shoj Utrish	Абрау, Лиманчик, Южная Озеревка / Abrau, Limanchik, Southern Ozereevka	«Флиши», скала Парус / «Flysches», Parus scaur	Бетта / Betta
Научная ценность / Scientific value					
1	Значимость для геологических исследований, редкость / Significance for geological researches, rarity	4	5	3	4
2	Количество типов (георазнообразие) / Number of types (geodiversity)	3	5	3	5
3	Степень научности (разнообразие геологических процессов и явлений) / Degree of scientific (diversity of geological processes and phenomenon)	3	5	3	4
4	Уникальность общая (национальный, региональный или локальный ранг) / Total uniqueness (national, regional or local grade)	2	5	2	3
5	Текущее состояние (степень деградации) / Current status (degree of degradation)	1	3	1	2
6	Геоконсервация / Geoconservation	1	1	0	0
Образовательная ценность / Edicational value					
7	Для интерпретации необходимы профессиональные знания / Professional knowledge is necessary for interpretation	2	3	2	3
8	Количество образовательных тематик / Number of educational topics	3	5	3	4
9	Обучение, просвещение или специализированная практика / Leaning, education and specialized practice	4	5	4	5
10	Условия наблюдения / Conditions of observation	3	4	3	4
Геотуристическая значимость / Geotourist value					
11	Туристическая инфраструктура и логистика, доступность / Tourist infrastructure, logistics and availability	3	5	3	4
12	Аттрактивность, окружающие природные и/или антропогенные ландшафты / Attractiveness, surrounding natural and/or anthropogenic landscapes	5	5	5	5
13	Ассоциация с другими природными объектами/явлениями / Association with other natural objects/manifestation	3	5	3	5
14	Возможность активного отдыха / Possibility of active recreation	2	2	3	3
15	Уязвимость, антропогенная нагрузка / Weakness, anthropogenic press	5	5	3	4
Всего относительно к 75 / Total relatively to 75		45	63	41	55
Общая значимость в масштабе Краснодарского края / Total value in scale of the Krasnodar krai		C / Middle	B / High	C / Middle	C / Middle

В качестве недостатков Большого Утриша, «Флишей» и скалы Парус можно отметить ограниченный транспортный доступ и размещение на самом объекте (узкая прибрежная зона, обрывистые берега без оборудованных спусков, плотная застройка или древесная растительность). В заповеднике «Большой Утриш» ведется просветительская естественнонаучная деятельность, разработаны экологические маршруты. Наполнение их геологической информацией привлечет и геотуристов. Преимуществом Бетты является георазнообразие, отсутствие природоохранного режима, развитая инфраструктура, наличие образовательных объектов (языковой лагерь, учебный полигон КубГУ).

Примером успешного менеджмента в демонстрации геологических объектов, образованных, как и кавказские, в альпийскую складчатость может служить российский геопарк «Ундория». В Испанских Пиренеях функционирует глобальный геопарк Бакского побережья. Одной из его главных примечательностей являются маршруты по флишевым отложениям мел–палеогенового возраста на протяжении 13 км вдоль берега Бискайского залива. Интеграция ОГН в существующую инфраструктуру будет значима для сохранения уникальных природных объектов Краснодарского края. На разрезах флишевой формации можно проводить профессиональные занятия, научно-популярные маршруты и просветительские экскурсии. Для развития геотуризма в регионе необходима разработка информационной основы специалистами на базе единого визит-центра или музея естественной истории с учетом мирового и российского опыта в геоконсервации.

Выводы

Проведенный анализ семи геосайтов на черноморском побережье показал их различную привлекательность для геотуристов. Средний геотуристический потенциал установлен для Большого Утриша, «Флишей» совместно со скалой Парус, Бетты, высокий – оз. Абрау вместе с Южной Озереевкой и оз. Лиманчик. Предложенный Беттинский геосайт отличается разнообразным комплексом геологических достопримечательностей, типичных для флишевой формации, круглогодичной доступностью и развитой инфраструктурой. Его региональная ценность представлена геоморфологическим, структурно-геологическим, седиментационным, палеогеографическим, стратиграфическим и неотектоническим типами геонаследия.

Литература

1. Алексеев А.С., Беньямовский В.Н., Кочергин Д.В., Копаевич Л.Ф. Первая находка тегулатоидного иноцерамидного двустворчатого моллюска в маастрихте Новороссийска (Северо-Западный Кавказ). // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. – 2018. – № 93(3). – С. 26–32.
2. Афанасьев С.Л. Геология Западного Кавказа. – М.: Воентехиздат, 2004. – 160 с.
3. Афанасьев С.Л. Путеводитель экскурсии 10-й Международной школы морской геологии. Верхнемеловая-датская флишевая формация Северо-Западного Кавказа. – М.: Ин-т океанологии, 1992. – 31 с.
4. Барабошкин Е.Ю., Барабошкин Е.Е. Глубоководные ихнокомплексы верхнего мела-палеоцена Северо-Западного Кавказа. // Материалы 8-го Всероссийского литологического совещания «Эволюция осадочных процессов в истории Земли». Т. 1. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2015. – С. 56–60.
5. Барабошкин Е.Ю., Бондаренко Н.А., Любимова Т.В. Уникальные геологические объекты Северо-Западного Кавказа. Путеводитель экскурсий 6-го Всероссийского совещания

«Меловая система России и ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии». Краснодар: КубГУ, 2012. – 28 с.

6. Большой Кавказ в альпийскую эпоху. / Редактор Ю.Г. Леонов. – М.: ГЕОС, 2007. – 368 с.

7. Геологические памятники природы России. / Под редакцией В.П. Орлова. – СПб.: Лориен, 1998. – 200 с.

8. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Серия Кавказская, Лист L-37-XXVI (Новороссийск). Объяснительная записка. – М.: Московский филиал ФГБУ ВСЕГЕИ, 2021а. – 132 с.

9. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Серия Кавказская. Лист L-37-XXXIII (Геленджик). Объяснительная записка. – М.: Московский филиал ФГБУ ВСЕГЕИ, 2021б. – 106 с.

10. Крицкая О.Ю., Попков В.И., Остапенко А.А. Палеосейсмические факторы формирования современного рельефа Черноморского побережья Кавказа на участке Анапа-Новороссийск. // Геоморфология. – 2017. – № 4. – С. 27–34.

11. Лыгина Т.И. Путеводитель полевой геологической экскурсии по Геленджикскому району. – Геленджик: Южморгеология, 2006. – 23 с.

12. Маринин А.В., Расцветаев Л.М. Структурные парагенезисы Северо-Западного Кавказа. Проблемы тектонофизики. – М.: ИФЗ РАН, 2008. – С. 191–224.

13. Микулаш Р., Дронов А.В. Палеоихнология – введение в изучение ископаемых следов жизнедеятельности. – Прага: Геологический институт Академии наук Чешской Республики, 2006. – 122 с.

14. Миронюк С.Г., Ионов В.Ю. Опыт и проблемы оценки устойчивости обвальнопользовных склонов морских побережий (на примере хребта Семисом, Краснодарский край). // Сборник материалов Международного семинара «Опасные для строительства геологические процессы», посвященного 70-летию В.П. Хоменко. – М.: МИСИ-МГСУ, 2019. – С. 33–39.

15. Несмеянов С.А., Измайлов Я.А., Воейкова О.А. Стратиграфия и тектонические деформации четвертичных морских террас Западного Кавказа и Тамани. – М.: Типография «Митель Пресс», 2021. – 184 с.

16. Панов Д.И. Этапы геологического развития Кавказо-Иранского сегмента Средиземноморского подвижного пояса в мезозое и кайнозое. // Бюллетень МОИП. Отдел Геологический. – 2013. – № 88(4). – С. 74–86.

17. Рубан Д.А. Новые находки следов жизнедеятельности палеоценовых морских организмов в окрестностях Абрау-Дюрсо (Краснодарский край). // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2014. – № 6. – С. 72–74.

18. Chlachula J., Mychko E. Geoheritage of the Kaliningrad region, SE Baltic Coast. // Geoheritage. – 2023. – Vol. 15. Art. No. 132. DOI: 10.1007/s12371-023-00899-6.

19. Herrera-Franco G.A., Carrion-Mero P.C., Mora-Frank C.V., Caicedo-Potos J.K. Comparative analysis of methodologies for the evaluation of geosites in the context of the Santa Elena-Ancón Geopark project. // International Journal of Design & Nature and Ecodynamics. – 2020. – Vol. 15. No. 2. – pp. 183–188. DOI: 10.18280/ij dne.150207.

20. Kubalikova L., Bajer A., Balkova M., Kirchner K., Machar I. Geodiversity action plans as a tool for developing sustainable tourism and environmental education // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. No. 10. Art. No. 6043. DOI: 10.3390/su14106043.

21. Mero P.C., Franco G.H., Briones J., Caldevilla P., Dominguez-Cuesta M.J., Berrezueta E. Geotourism and local development based on geological and mining sites utilization, Zaruma-Portovelo, Ecuador. // Geosciences. – 2018. – Vol. 8. Art. No. 205. DOI: 10.3390/geosciences8060205.

22. Ruban D., Mikhailenko A.V., Yashalova N.N. Valuable geoheritage resources: potential versus exploitation. // Resources Policy. – 2022. – Vol. 77. Art. No. 102665. DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.102665.

23. Ruban D.A. On the Duality of Marine Geoheritage: Evidence from the Abrau Area of the Russian Black Sea Coast. // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 9. Art. No. 921. DOI: 10.3390/jmse9090921.

24. Yashalova N.N., Ruban D.A. Geoheritage value of three localities from Kislovodsk in the southern Central Ciscaucasus: a resource of Large Resort Area. // *Geosciences*. – 2024. – Vol. 14. Art. No. 134. DOI: 10.3390/geosciences14050134.

References

1. Alekseev A.S., Beniamovsky V.N., Kochergin D.V., Kopaevich L.F. First find of tegulatoid inoceramid in Maastrichtian of Novorossiisk area (Northwestern Caucasus). *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series*. 2018. Vol. 93. No. 3. pp. 26–32. (In Russ.)

2. Afanasyev S.L. *Geology of Western Caucasus*. Moscow. Voentechizdat. 2004. 160 p. (In Russ.)

3. Afanasyev S.L. The guidebook of the 10th International School of Marine Geology. Upper Cretaceous-Danian Flysch formation of the North-Western Caucasus. Moscow. Institute of Oceanology. 1992. 31 p. (In Russ.)

4. Baraboshkin E.Y., Baraboshkin E.E. Deep-sea ichnocomplexes of the Upper Cretaceous-Paleocene of the North-West Caucasus. In: *Evolution of sedimentary processes in the history of the Earth*. Vol. 1. Moscow. Gubkin Russian State University of Oil and Gas. 2015. pp. 56–60. (In Russ.)

5. Baraboshkin E.Y., Bondarenko N.A., Lyubimova T.V. Unique geological objects of the North-West Caucasus. Excursion Guide of the 6th All-Russian conference “Cretaceous system of Russia and Near Abroad: problems of stratigraphy and paleogeography”. Krasnodar. KubSU. 2012. 28 p. (In Russ.)

6. *The Greater Caucasus in the Alpine epoch*. Ed. Yu.G. Leonov. Moscow. GEOS. 2007. 368 p. (In Russ.)

7. *Geological nature sanctuaries of Russia*. Ed. V.P. Orlov. Saint Petersburg. Lorient. 1998. 200 p. (In Russ.)

8. State geological map of the Russian Federation scale 1:200 000. Caucasus Serie. Sheet L-37-XXVI (Novorossiisk). Explanatory note. Moscow. Moscow branch of FSBI VSEGEI. 2021a. 132 p. (In Russ.)

9. State geological map of the Russian Federation scale 1:200 000. Caucasus Serie, Sheet L-37-XXXIII (Gelendzhik). Explanatory note. Moscow. Moscow branch of FSBI VSEGEI. 2021b. 106 p. (In Russ.)

10. Kritskaya O.Yu., Popkov V.I., Ostapenko A.A. Paleoseismic factors of formation of modern relief of the Black Sea coast of the Caucasus in the Anapa-Novorossiisk area. *Geomorphology*. 2017. Vol. 4. pp. 27–34. (In Russ.)

11. Lygina T.I. Guide to a field geological excursion in the Gelendzhik region. Gelendzhik. Yuzhmorgeologiya. 2006. 23 p. (In Russ.)

12. Marinin A.V., Rasctvetaev L.M. Structural parageneses of the North-West Caucasus. *Problems of Tectonophysics*. Moscow. IPE RAS. 2008. pp. 191–224. (In Russ.)

13. Mikulas R., Dronov A.V. *Paleoichnology – an introduction to the study of fossil traces of life*. Prague. Geological Institute of the Academy of Sciences of the Czech Republic. 2006. 122 p. (In Russ.)

14. Mironyuk S.G., Ionov V.Yu. Experience and problems of assessing the stability of landslide slopes of sea coasts (on the example of the Semisom ridge, Krasnodar Krai). In: *Proc. of the Int. seminar Geological processes dangerous for construction, dedicated to the 70th anniversary of V.P. Khomenko*. Moscow. MISI-MSUE. 2019. pp. 33–39. (In Russ.)

15. Nesmeyanov S.A., Izmailov Ya.A., Voeikova O.A. *Stratigraphy and tectonic deformations of the Quaternary marine terraces of the Western Caucasus and Taman*. Moscow. Printing house Mittel Press. 2021. 184 p. (In Russ.)

16. Panov D.I. Phases of geological evolution of Caucasus-Iranian segment of Mediterranean fold belt during Mesozoic and Cenozoic. *Bulletin of the Moscow Society of Nature Researchers. Geology Department*. 2013. Vol. 88. No. 4. pp. 74–86. (In Russ.)
17. Ruban D.A. New finds of traces of life activity of Paleocene marine organisms in the vicinity of Abrau-Dyurso (Krasnodar Krai). In: *Proceedings of higher educational institutions. Geology and Exploration*. 2014. Vol. 6. pp. 72–74. (In Russ.)
18. Chlachula J., Mychko E. Geoheritage of the Kaliningrad region, SE Baltic Coast. *Geoheritage*. 2023. Vol. 15. Art. No. 132. DOI: 10.1007/s12371-023-00899-6.
19. Herrera-Franco G.A., Carrion-Mero P.C., Mora-Frank C.V., Caicedo-Potos J.K. Comparative analysis of methodologies for the evaluation of geosites in the context of the Santa Elena-Ancón Geopark project. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*. 2020. Vol. 15. No. 2. pp. 183–188. DOI: 10.18280/ij dne.150207.
20. Kubalikova L., Bajer A., Balkova M., Kirchner K., Machar I. Geodiversity action plans as a tool for developing sustainable tourism and environmental education. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. No. 10. Art. No. 6043. DOI: 10.3390/su14106043.
21. Mero P.C., Franco G.H., Briones J., Caldevilla P., Dominguez-Cuesta M.J., Berrezueta E. Geotourism and local development based on geological and mining sites utilization, Zaruma-Portovelo, Ecuador. *Geosciences*. 2018. Vol. 8. Art. No. 205. DOI: 10.3390/geosciences8060205.
22. Ruban D., Mikhailenko A.V., Yashalova N.N. Valuable geoheritage resources: potential versus exploitation. *Resources Policy*. 2022. Vol. 77. Art. No. 102665. DOI: 10.1016/j.resour-pol.2022.102665.
23. Ruban D.A. On the Duality of Marine Geoheritage: Evidence from the Abrau Area of the Russian Black Sea Coast. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9. Art. No. 921. DOI: 10.3390/jmse9090921.
24. Yashalova N.N., Ruban D.A. Geoheritage value of three localities from Kislovodsk in the southern Central Ciscaucasus: a resource of Large Resort Area. *Geosciences*. 2024. Vol. 14. Art. No. 134. DOI: 10.3390/geosciences14050134.

УДК 622. 273:65.011.12

DOI: 10.46698/VNC.2025.73.38.002

Оригинальная статья

Итерационное моделирование технологий разработки месторождений Садонской геологической провинции

В.И. Голик 

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

Статья поступила: 23.06.2025, доработана: 02.09.2025, принята к публикации: 06.09.2025

Резюме: Рассмотрены вопросы оптимизации экологии РСО–Алания за счет совершенствования технологии утилизации техногенных ресурсов, накопленных в хранилищах хвостов обогащения за годы эксплуатации месторождений Садонской геологической провинции. **Актуальность** исследования определяется необходимостью ослабления вредного влияния горного производства на окружающую среду. **Методы:** обобщение, систематизация, эксперимент, моделирование, технико-экономические расчеты и инженерное прогнозирование. **Результаты.** Приведена справка об истории промышленной разработки рудных месторождений геологической провинции с детализацией сведений о техногенных ресурсах в хранилищах хвостов переработки руд. Показано, что препятствием для утилизации отходов горного производства является неполное извлечение металлов, в связи с чем хвосты представляют собой материальную ценность, являясь генераторами химического загрязнения экосистем окружающей среды. Обобщены сведения о продуктах переработки руд и приведены модели для определения эколого-экономической целесообразности вовлечения в производство омертвленных ресурсов. Рекомендовано оптимизированное по критерию эффективности извлечения металлов оборудование, в основе которого лежит феномен активации вещества приложением энергии. Отмечена возможность повышения эффективности охраны среды уменьшением количества разубоживающих минералов в руде, что обеспечивается закладкой выработанного пространства смесями на основе отходов переработки и хвостами выщелачивания в недрах. Представлены результаты выщелачивания свинца и цинка из сульфидных руд Какадур-Ханикомского месторождения. Определено, что использование новой технологии добычи руд намного экономичнее базового варианта. Представлены результаты расчета эффективности применения отходов для изготовления твердеющих смесей одновременно рудника и доломитового карьера. Моделированием установлено, что комбинированная технология экономичнее базовой технологии.

Ключевые слова: техногенные ресурсы, горное производство, окружающая среда, хвосты переработки, утилизация, выщелачивание, технология.

Для цитирования: Голик В.И. Итерационное моделирование технологий разработки месторождений Садонской геологической провинции. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 199-210. DOI: 10.46698/VNC.2025.73.38.002

DOI: 10.46698/VNC.2025.73.38.002

Original paper

Iterative modeling of field development technologies in the Sadon geological province

V.I. Golik 

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

Received: 23.06.2025, revised: 02.09.2025, accepted: 06.09.2025

Abstract: The issues of optimizing the ecology of the Republic of North Ossetia–Alania due to the improvement of technology for the utilization of anthropogenic resources accumulated in the enrichment tailings during the years of operation of the deposits of the Sadon geological province are considered. **The relevance** of the study is determined by the need to reduce the harmful effects of mining on the environment. **Methods:** generalization, systematization, experiment, modeling, technical and economic calculations and engineering forecasting. **Results.** A reference on the history of industrial development of ore deposits in the geological province is provided, detailing information on anthropogenic resources in ore processing tailings storages. It is shown that an obstacle to the disposal of mining waste is the incomplete extraction of metals, and therefore tailings are of material value, being generators of chemical pollution of environmental ecosystems. Information on processed products from ores is summarized and models are presented to determine the ecological and economic feasibility of involving dead resources in production. An equipment optimized according to the criterion of metal extraction efficiency is recommended, which is based on the phenomenon of activation of matter by the application of energy. The possibility of increasing the effectiveness of environmental protection by reducing the amount of diluting minerals in the ore is noted, which is ensured by laying the exhausted space with mixtures based on processing waste and leaching tailings in the subsurface. The results of lead and zinc leaching from sulfide ores of the Kakadur-Khanikom deposit are presented. The results of the calculation of the efficiency of waste application for the manufacture of hardening mixtures of a mine and a dolomite quarry at the same time are presented. Modeling has established that the combined technology is more economical than the basic technology.

Keywords: anthropogenic resources, mining, environment, tailings processing, recycling, leaching, technology.

For citation: Golik V.I. Iterative modeling of field development technologies in the Sadon geological province. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 199–210. DOI: 10.46698/VNC.2025.73.38.002

Введение

Республика Северная Осетия–Алания располагает техногенными ресурсами, образованными в результате предыдущей деятельности. В отвалах Электроцинка, Победита и ССЦК скопилось более 10 млн тонн отходов.

Основной причиной накопления хвостов обогащения является то, что возможности современных технологий не позволяют извлекать полезные компоненты полностью [Голик, 2022; Bloodworth, Gunn, 2012; Каменецкий и др., 2012; Pereira et al., 2022].

Актуальность исследований данного направления увеличивается в связи с расположением Садонского геологического узла в системе северного склона Большого Кавказа в сложных геодинамических условиях [Чотчаев и др., 2021; Адигамов, Юденков, 2021; Батугин и др., 2021; Свалова, 2022; Бурдзиева и др., 2023, 2024а, б; Ключев и др., 2024]. Учет этих условий повышает актуальность учета потенциаль-

ных рисков при разработке месторождений, особенно, подземным способом [Ляшенко и др., 2020; Музаев и др., 2022; Голик, Бурдзиева, 2023; Куликова и др., 2023; Валиев и др., 2023; Lei, Gao, 2019].

Решению рассматриваемой проблемы способствует разработка новых технологий, которые в комбинации с традиционными снижают напряженность экологической обстановки в регионе РСО–Алания и др. [Brigida et al., 2023; Ma et al., 2024; Комащенко, 2015; Lakshmanan et al., 2016]. Исследования данного направления горного дела осуществляются с использованием современных методов и способов [Голик и др., 2018; Рыбак и др., 2022; Конгар-Сюрюн, Ковальский, 2023; Голик, Бурдзиева, 2024; Zaalishvili et al., 2016; Фоменко и др., 2025].

Цель статьи – оптимизация экономики и экологии региона за счет совершенствования технологии утилизации техногенных ресурсов.

Методы

Обобщение, систематизация, анализ, математическое и экономическое моделирование, эксперимент и обработка данных с анализом результатов.

Результаты

Эколого-экономическая целесообразность вовлечения в производство хвостов обогащения:

$$\mathcal{E} = P - 3,$$

где $\mathcal{E}$ – экономический эффект, руб.:

P – стоимость полученной товарной продукции, руб.;

3 – затраты, руб.

Результаты вовлечения хвостов обогащения в производство:

$$R = A \Pi,$$

где A – производственная мощность предприятия в t -ом году, ед./год;

Π – ценность произведенного в t -ом году суммарного продукта, руб./ед.

Схема извлечения металлов из жидких хвостов приведена на рисунке 1.

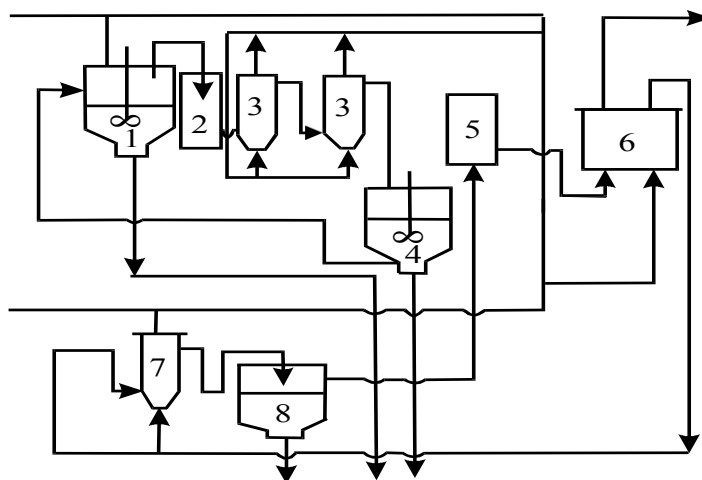


Рис. 1. Извлечение металлов из жидких хвостов: 1 – сгуститель; 2 – накопитель;

3 – электрохимический активатор; 4 – отстойник; 5 – нейтрализатор;

6 – электродиализатор; 7 – электролизер; 8 – отстойник /

Fig. 1. Extraction of metals from liquid tailings: 1 – thickener; 2 – accumulator; 3 – electrochemical activator; 4 – sump; 5 – neutralizer; 6 – electrodialyzer; 7 – electrolyzer; 8 – sump

Схема извлечения металлов в дезинтеграторе с механохимической активацией дана на рисунке 2.

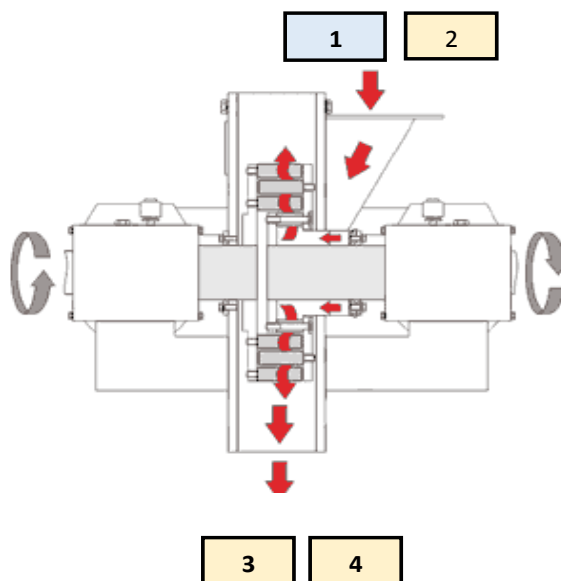


Рис. 2. Схема выщелачивания хвостов в дезинтеграторе:

1 – минералы; 2 – раствор реагентов; 3 – производственный раствор; 4 – вторичные хвосты /

Fig. 2. Schematic diagram of tailings leaching in a disintegrator:

1 – minerals; 2 – reagent solution; 3 – production solution; 4 – secondary tailings

Схема применения деметаллизированных хвостов обогащения для изготовления бетонных смесей приведена на рисунке 3.

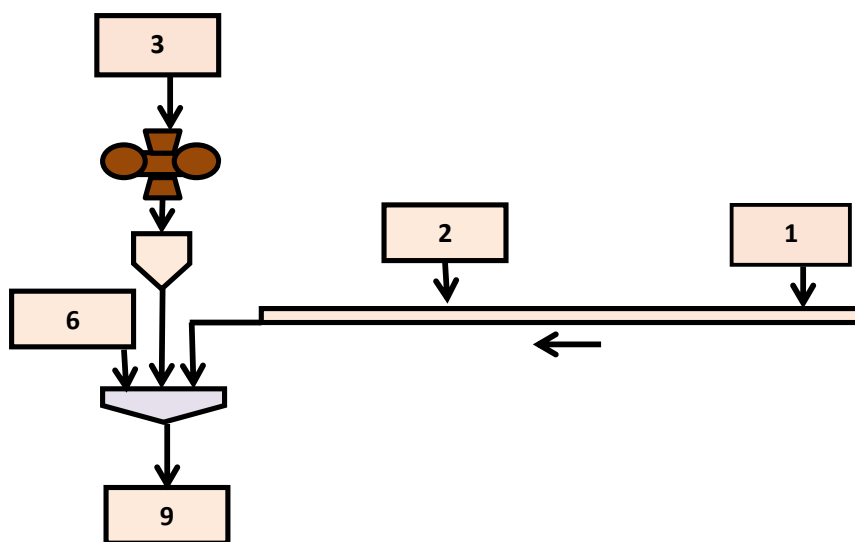


Рис. 3. Схема комплексной активации твердеющих смесей: 1 – бункер цемента;

2 – инертные заполнители; 3 – вяжущие добавки; 4 – дезинтегратор; 5 – вибромельница;

6 – активированная вода; 7 – конвейер; 8 – смеситель; 9 – отправка /

Fig. 3. Schematic diagram of the comprehensive activation of hardening mixtures: 1 – cement silo;

2 – inert fillers; 3 – binding additives; 4 – disintegrator; 5 – vibrating mill;

6 – activated water; 7 – conveyor; 8 – mixer; 9 – dispatch

Показатели альтернативных технологий при отработке сульфидных руд Какадур-Ханикомского месторождения приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

**Сравнительные экономические показатели технологий /
Comparative economic indicators of technologies**

Показатели / Indicators	Значения / Values	Технологии/ Technologies	
		Базовая / Basic	Новая / New
Капитальные затраты, руб. /т / Capital expenditures, rub. /t	17,2	14,1	5,0
Эксплуатационные затраты, руб. /т / Operating costs, , rub. /t	0,69	0,65	0,22
Руды в переработке, тыс. т/год / Ores in processing, thousand t/year	240	240	300
Содержание металлов в руде, % / The content of metals in the ore, %	3,5	5,5	>1
Извлечение металла, % / Metal extraction, %	75*	90	75

Использование новой технологии добычи руд характеризуется лучшими показателями по сравнению с базовым вариантом.

На первом этапе итерационного исследования применяли твердеющие смеси базового состава (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Показатели комбинированной технологии (этап 1) /
Indicators of combined technology (stage 1)**

Показатели / Indicators	Единицы измерения/ Units of measurement	Технологии / Technologies	
		Базовая / Basic	Новая / New
Разубоживание / Dissuading	%	30	10
Потери / Losses	%	20	0
Добыча горными работами / Mining operations	%	100	200
Выпуск концентратов: свинцовых цинковых / Production of concentrates: lead zinc	Т/год / T/year Т/год / T/year	7000 10000	10500 15500
Образовано хвостов / Formed by tails	Тыс. т / Thousand tons	800	-
Получено свинцовых концентратов / Lead concentrates were obtained	Т/год / T/year	-	440
Получено цинковых концентратов / Zinc concentrates were obtained	Т/год / T/year	-	680
Стоимость концентратов / The cost of concentrates	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	19608
Стоимость товаров из отходов / The cost of goods from waste	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	344
Стоимость прочих металлов / The cost of other metals	Тыс. руб. Thousand rubles	-	688
Стоимость активированной воды / The cost of activated water	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	344
Всего попутной продукции / Total associated products	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	20984
Результаты применения технологий/ Results of the technology application	Тыс. руб./год / Thousand rubles/year	12900	33884
Экономия на годовой объем / Annual volume savings	Тыс. руб./год / Thousand rubles/year	-	20984
Экономия / Savings	%	-	160

На втором этапе исследований доломиты активировали в шаровой мельнице, а высебки хвостов обогащения использовали как заполнитель (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

**Показатели комбинированной технологии (этап 2) /
Indicators of combined technology (stage 2)**

Показатели / Indicators	Единицы измерения/ Units of measurement	Технологии / Technologies	
		Базовая / Basic	Новая / New
Разубоживание / Dissuading	%	30	10
Потери / Losses	%	20	5
Добыча металлов горными работами / Mining of metals	%	100	115
Выпуск концентратов: свинцовых цинковых / Production of concentrates: lead zinc	Тонн/год Тонн/год Tons/year Tons/year	7000 10000	8500 11500
Стоимость концентратов: свинцовых цинковых / The cost of concentrates: lead zinc	Руб./т Руб./т Rub./t Rub./t	954,6 619,2	954,6 619,2
Дополнительно свинцовых концентратов / Additional lead concentrates	Тонн/год Tons/year	-	300
Дополнительно цинковых концентратов / Additional zinc concentrates	Тонн/год Tons/year	-	600
Стоимость концентратов из хвостов / The cost of concentrates from tailings	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	688
Стоимость строительных материалов / Cost of building materials	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	1032
Всего стоимость продуктов / Total cost of products	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	2377
Результаты применения технологий Technology application results	Тыс. руб. год / Thousand rubles a year	12874,2	15251,2
Экономия на годовой объем / Annual volume savings	Тыс. руб. год / Thousand rubles a year	-	2377
Экономия / Savings	%	-	20

Технология с заполнением выработанного пространства твердеющими смесями оказалась экономичнее базовой технологии на 20 %.

На третьем этапе сравниваются технологии с утилизацией отходов Садонского СЦК и Боснийского доломитового карьера в рамках единой системы (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

**Показатели комбинированной технологии (этап 3) /
Indicators of combined technology (stage 3)**

Показатели / Indicators	Единицы измерения / Units of measurement	Технологии / Technologies	
		Базовая/ Basic	Новая/ New
Разубоживание / Dissuading	%	30	10
Потери / Losses	%	20	5
Добыча металлов / Metal mining	%	100	115

Выпуск концентратов: свинцовых цинковых / Production of concentrates: lead zinc	Тонн/год Тонн/год Tons/year Tons/year	7000 10000	8500 11500
Цена концентратов: свинцовых цинковых / The price of concentrates: of lead zinc	Руб./т Руб./т Rub./t Rub./t	954,6 619,2	954,6 619,2
Производительность по горной массе / Rock mass productivity	Тыс. м³/год / Thousand m³/year	170	170
Объем образуемых пустот в год / The volume of voids formed per year	Тыс. м³/год / Thousand m³/year	220	190
Получено концентратов: свинцовых цинковых / Concentrates obtained: lead zinc	Тонн/год Тонн/год Tons/year Tons/year	- -	300 600
Концентратов из переработки хвостов / Concentrates from tailings processing	Тыс. руб. Thousand rubles	-	688
Стоимость строительных материалов / Cost of building materials	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	2832
Всего стоимость продуктов утилизации / Total cost of recycling products	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	4177
Результаты использования технологий/ Technology usage results	Тыс. руб. /год / Thousand rubles /year	12874	17051
Экономия на годовой объем / Annual volume savings	Тыс. руб./год / Thousand rubles /year	-	4177
Экономия на 1 тонну концентрата / Savings per 1 ton of concentrate	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	208.9
Экономия / Savings	%	-	32

После дезинтегратора отмечается снижение тонкости помола и удельной поверхности фракции менее 0,1 мм.

Эффективность комбинирования возможностей рудника и карьера иллюстрируется в таблице 5.

Таблица 5 / Table 5

**Эффективность координации работы рудника и карьера /
The effectiveness of mine and quarry coordination**

Показатели / Indicators	Единицы измерения/ Units of measurement	Технологии / Technologies	
		Базовая /Basic	Новая /New
Извлекаемая ценность руды / Recoverable value of ore	Тыс. руб./год / Thousand rubles/year	12874,2	17051
Выход металла в концентрат / Metal output to concentrate	Тонн/тонн / Tons/tons	0,168	0,271
Затраты на модернизацию технологии/ Technology upgrade costs	Млн руб. / Million rubles	26,8	142,07
Прибыль на объем добычи / Profit on production volume	Млн руб. / Million rubles	-	4177
Удельная прибыль / Unit profit	Руб./тонн / Rub/ton	-	208.9

Типизация технологий разработки месторождений по признаку использования отходов приведена в таблице 6.

Таблица 6 / Table 6

Типизация технологий / Technology typing

Типы технологий / Types of technologies	Признаки / Signs	Использование / Using	Состояние земли / The state of the earth
С обрушением пород / With the collapse of rocks	Повышенное разубоживание руд / Increased dilution of ores	Увеличение разубоживания и выхода хвостов / Increasing the separation and exit of tails	Деградация земель в зоне влияния горных работ / Land degradation in the mining area
С закладкой выработанного пространства / With a bookmark of the developed space	Снижение разубоживания и выхода хвостов / Reduced tail separation and stroke	Использование отходов в составе закладки / The use of waste products as part of masonry	Снижение темпов деградации / Reducing the rate of degradation
С использованием хвостов выщелачивания / Using leaching needles	Радикальное снижение объема хвостов / Radical reduction of tail volume	Управление состоянием массивов / Array state management	Влияние при нарушении режимов / The impact of regime violations
Комбинированные / Combined	В зависимости от объемов комбинирования / Depending on the volume of the combination	Использование отходов в зависимости от типа / Using moves depending on the type	Влияние при нарушении режима / Influence in case of regime violation

Выводы

1. Оценка эффективности функционирования горного предприятия должна производиться по сумме результатов деятельности предприятия с учетом производства товарной продукции, использования отходов, высвобождения земель и социально-экологических последствий.

2. Эколого-экономическая эффективность новых технологий зависит от их соответствия критериям эффективности добычи и переработки.

Литература

1. 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.
2. Батугин А.С., Шевчук С.В., Шерматова С.С., Головки И.В., Зундуйжамц Б. К вопросу мониторинга геоэкологической 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.
3. Бурдзиева О.Г., Козырев Е.Н., Кортиев А.Л., Ревазов М.О. Особенности формирования геоэкологических рисков горной территории на основе анализа причинно-следственных связей геодинамических эндогенных и экзогенных процессов. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 10. № 4. – С. 124–134. DOI: 10.46698/VNC.2023.88.99.010.

4. Бурдзиева О.Г., Мельков Д.А., Ревазов М.О., Кортиев А.Л. Активизация оползневых процессов, обусловленная урбанизацией горных территорий. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024б. – Т. 16. № 4. – С. 1646–1658. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1646-1658.

5. Бурдзиева О.Г., Ревазов М.О., Кортиев А.Л., Гогичев Р.Р. Влияние воздействия геодинамических процессов на геоэкологическую нагрузку горного региона. // Геология и геофизика Юга России. – 2024а. – Т. 14. № 4. – С. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014.

6. Валиев Н.Г., Пропп В.Д., Абрамкин Н.И., Камболов Д.А. Практика применения выщелачивания металлов из некондиционного сырья и отходов обогащения руд. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12-1. – С. 17–30. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_17.

7. Голик В.И. Перспективное направление восстановления потенциала Садона (РСО-Алания). // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. № 1. – С. 68–75. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-68-75.

8. 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.

9. Голик В.И., Бурдзиева О.Г. К концепции разработки месторождений Садонского рудного пояса. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. №3. – С. 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014.

10. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Комащенко В.И., Разоренов Ю.И. Экологические аспекты хранения хвостов обогащения руд в горном регионе. // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22. № 6. – С. 35–39.

11. Каменецкий Е.С., Радионов А.А., Тимченко В.Ю., Панаэтова О.С. Математическое моделирование распределения химических веществ и твердой фазы хвостов, осаждающихся на горных склонах в районе Фиагдонского хвостохранилища РСО-Алания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. № 3. – С. 349–361. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-349-361.

12. Клюев Р.В., Мартюшев Н.В., Кукарцев В.В., Кукарцев В.А., Бригида В.С. Анализ геологической информации для обеспечения устойчивого функционирования горнотехнических систем. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 5. – С. 144–157. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_144.

13. Комащенко В.И. Эколого-экономическая целесообразность утилизации горнопромышленных отходов с целью их переработки. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2015. – № 4. – С. 23–30.

14. Конгар-Сюрюн Ч.Б., Ковальский Е.Р. Твердеющие закладочные смеси на калийных рудниках: перспективные материалы, регулирующие напряжённо-деформированное состояние массива. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 177–187. DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014.

15. Куликова Е.Ю., Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Комплексная оценка геотехнических рисков в шахтном и подземном строительстве. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. № 1. – С. 7–16. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16.

16. Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Голик В.И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах. // Горные науки и технологии. – 2020. – Т. 5. № 2. – С. 104–118.

17. Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И. Математическое моделирование сдвиговых сейсмических колебаний массива состоящего из рекультивированного материала отложения горно-рудной промышленности (хвосты). // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 2. – С. 19–33. DOI: 10.46698/VNC.2022.34.57.002.

18. 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.

19. Свалова В.Б. Управление геоэкологическим риском и проблемы устойчивого развития горных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 1. – С. 129–147. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010.

20. Фоменко В.А., Маковозова З.Э., Соколов А.А., Аксенова М.А., Ковалев Г.С. Анализ водного режима и эволюции массива грунтов рекультивированного объекта горного производства. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 5. – С. 118–129. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_118.

21. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 1. – С. 81 – 94. DOI: 10.46698/VNC. 2021.15.66.007.

22. Bloodworth A., Gunn G. The future of the global minerals and metals sector: issues and challenges out to 2050. // *Geosciences*. – 2012. – No 15. – pp. 90–97.

23. Brigida V.S., Golik V.I., Klyuev R.V., Sabirova L.B., Mambetalieva A.R., Karlina Yu.I. Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining. // *Metallurgist*. – 2023. – Vol. 67. No. 3-4. – pp. 398–408. DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.

24. Lakshmanan V.I., Roy R., Halim M.A. Innovative process development in metallurgical industry. Switzerland: Springer, 2016. – pp 359–383. DOI: 10.1007/978-3-319-21599-0_18.

25. Lei Q., Gao K. A numerical study of stress variability in heterogeneous fractured rocks. // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2019. – Vol. 113. – pp. 121–133.

26. 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 & Recycling Advances*. – 2024. – Vol. 23. Art. No. 200224. DOI: 10.1016/j.rcradv.2024.200224.

27. Pereira F.C., Lima T., Chaves S.S., Vilca Y.C., Canabrava L.P. Stability analysis of free span in excavations with diameter greater than 10 meters—Study case in the correjo do sitio mine. In: *Proc. of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering “Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure”. Development—Full Papers: Ser. Proceedings in Earth and Geosciences*. Vol. 6. London: CRC Press, – 2020. – pp. 878–883.

28. Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maysuradze M.V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory. // *International Journal of GEOMATE*. – 2016. – Vol. 10. Issue 1. – pp. 1693–1697.

References

1. Adigamov A.E., Yudenzov 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.)

2. Batugin A.S., Shevchuk S.V., Shermatova S.S., Golovko I.V., Zunduyzhamts B. Geoeological 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_10_1_63. (In Russ.)

3. Burdzieva O.G., Kozyrev E.N., Kortiev A.L., Revazov M.O. Features of formation of geoeological risks in the mountainous territory based on the analysis of cause-and-effect relations of geodynamic endogenous and exogenous processes. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 124–134. DOI: 10.46698/VNC.2023.88.99.010. (In Russ.)

4. Burdzieva O.G., Revazov M.O., Kortiev A.L., Gogichev R.R. Influence of geodynamic processes on the geoeological load of mountain region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014. (In Russ.)

5. Burdzieva O.G., Melkov D.A., Revazov M.O., Kortiev A.L. Activation of landslide processes caused by urbanization of mountainous areas. *Sustainable Development of Mountain*

Territories. 2024, Vol. 16, No. 4. pp. 1646–1658. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1646-1658. (In Russ.)

6. Valiev N.G., Propp V.D., Abramkin N.I., Kambolov D.A. The practice of leaching metals from substandard raw materials and ore dressing waste. Mining Information and Analytical Bulletin. 2023. No. 12–1. pp. 17–30. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_17. (In Russ.)

7. Golik V.I. Promising direction of Sadon's potential recovery (RNO-Alania). Sustainable Development of Mountain Territories. 2022. Vol. 14. No. 1. pp. 68–75. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-68-75. (In Russ.)

8. 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.)

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

10. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Komashchenko V.I., Razorenov Yu.I. Ecological aspects of storage of ore dressing tailings in the mountainous region. Ecology and Industry of Russia. 2018. Vol. 22. No. 6. pp. 35–39. (In Russ.)

11. Kamenetsky E.S., Radionoff A.A., Timchenko V.U., Panaetova O.S. Mathematical modeling of distribution of the chemicals and the solid phase of tailings deposited on the mountain gorge slopes near the Fiagdon tailings, North Ossetia-Alania. Sustainable Development of Mountain Territories. 2022. Vol. 14. No. 3. pp. 349–361. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-349-361. (In Russ.)

12. Klyuev R.V., Martyushev N.V., Kukartsev V.V., Kukartsev V.A., Brigida V. Analysis of geological information toward sustainable performance of geotechnical systems. Mining Information and Analytical Bulletin. 2024. No. 5. pp. 144–157. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_144. (In Russ.)

13. Komashchenko V.I. Ecological and economic feasibility of utilization of mining waste for the purpose of their processing. News of the Tula State University. Sciences of Earth. 2015. No. 4. pp. 23–30. (In Russ.)

14. Kongar-Syuryun Ch.B., Kovalski E.R. Hardening backfill at potash mines: promising materials regulating stress-strain behavior of rock mass. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 177–187. DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014. (In Russ.)

15. Kulikova E.Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O.V. Complex estimation of geotechnical risks in mine and underground construction. Sustainable Development of Mountain Territories. 2023. Vol. 15. No. 1. pp. 7–16. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16. (In Russ.)

16. Lyashenko V.I., Khomenko O.E., Golik V.I. Development of environmental protection and resource-saving technologies of underground ore mining in energy-damaged massifs. Mining Sciences and Technologies. 2020. Vol. 5. No. 2. pp. 104–118. (In Russ.)

17. Muzaev I.D., Harebov K.S., Muzaev N.I. Mathematical modeling of shear seismic vibrations of an array consisting of recultivated material deposits of the mining industry (tailings). Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 19–33. DOI: 10.46698/VNC.2022.34.57.002. (In Russ.)

18. Rybak J., Khayrutdinov M.M., Kuziev D.A., Kongar-Syuryun Ch.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. pp. 61–70. DOI: 10.31897/PMI.2022.2. (In Russ.)

19. Svalova V.B. Geoecological risk management and problems of sustainable development of mountain territories. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 129–147. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010. (In Russ.)

20. Fomenko V.A., Makovozova Z.E., Sokolov A.A., Aksenova M.A., Kovalev G.S. Analysis of water conditions and evolution of rock mass at a mining industry object after reclamation.

Mining Information and Analytical Bulletin. 2025. No. 5. pp. 118–129. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_118. (In Russ.)

21. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high mountainous areas by geoecological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 81–94. DOI: 10.46698/VNC. 2021.15.66.007. (In Russ.)

22. Bloodworth A., Gunn G. The future of the global minerals and metals sector: issues and challenges out to 2050. *Geosciences*. 2012. No 15. pp. 90–97.

23. Brigida V.S., Golik V.I., Klyuev R.V., Sabirova L.B., Mambetalieva A.R., Karlina Yu.I. Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining. *Metallurgist*. 2023. Vol. 67. No. 3-4. pp. 398–408. DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.

24. Lakshmanan V.I., Roy R., Halim M.A. Innovative process development in metallurgical industry. Switzerland. Springer. 2016. pp 359–383. DOI: 10.1007/978-3-319-21599-0_18.

25. Lei Q., Gao K. A numerical study of stress variability in heterogeneous fractured rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019. Vol. 113. pp. 121–133.

26. 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 & Recycling Advances*. 2024. Vol. 23. Art. No. 200224. DOI: 10.1016/j.rcradv.2024.200224.

27. Pereira F.C., Lima T., Chaves S.S., Vilca Y.C., Canabrava L.P. Stability analysis of free span in excavations with diameter greater than 10 meters—Study case in the corrego do sitio mine. In: *Proc. of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering “Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure”*. Development—Full Papers: Ser. Proceedings in Earth and Geosciences. Vol. 6. London. CRC Press. 2020. pp. 878–883.

28. Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maysuradze M.V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory. *International Journal of GEOMATE*. 2016. Vol. 10. Issue 1. pp. 1693–1697.

УДК 550.8:504.5:553.63:628.1/.3

DOI: 10.46698/VNC.2025.44.49.001

Оригинальная статья

Геофизическая оценка эффективности цеолитсодержащих барьеров для защиты вод от загрязнения на горнопромышленных территориях

Т.А. Панфилова^{1,2}, В.В. Кукарцев^{2,3}, Е.В. Худякова³,
М.Н. Степанцевич³, Л.В. Красовская³

¹ Сибирский федеральный университет, Россия, 660041,
г. Красноярск, пр. Свободный, 79;

² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5,
e-mail: t_pan80@mail.ru;

³ Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева,
Россия, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49,
e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru, vhudyakova@rgau-msha.ru,
stepancevich@rgau-msha.ru, kraslud@yandex.ru

Статья поступила: 14.06.2025, доработана: 02.09.2025, принята к публикации: 06.09.2025

Резюме: Актуальность работы. Загрязнение водных ресурсов тяжёлыми металлами в районах горнопромышленной деятельности остаётся одной из наиболее острых экологических проблем юга России. Для минимизации рисков миграции токсикантов в гидросферу применяются природные сорбционные материалы, среди которых цеолиты выделяются высокой доступностью и селективностью. Важной задачей становится разработка неразрушающих методов оценки эффективности таких барьеров в реальных условиях эксплуатации. **Цель исследования.** Экспериментально обосновать эффективность цеолитсодержащих барьеров для защиты водных ресурсов горнопромышленных территорий и продемонстрировать возможности применения геофизических методов для мониторинга их состояния. **Методы исследования.** В данной работе был проведён комплекс лабораторных и полевых испытаний с использованием природного клиноптилолита из Западного Прикаспия. На опытном полигоне применялись электротомография, георадар и сейсмоакустические измерения, синхронизированные с анализом фильтратов и физико-химических свойств образцов. Дополнительно внедрена автоматизированная станция телеметрического контроля влажности и удельного сопротивления в режиме реального времени. **Результаты.** В результате проведенных исследований установлено, что цеолитсодержащие барьеры обеспечивают снижение концентраций тяжёлых металлов до 77,8–92,3 %, а коэффициент эффективного использования сорбционного ресурса достигает 0,59. Геофизические методы выявили высокую чувствительность к изменениям структуры и гидрогеохимических параметров барьера, включая снижение удельного сопротивления и pH, рост плотности и перестройку минеральной структуры. Интеграция полевых и аналитических данных показала, что предложенный подход позволяет оперативно диагностировать зоны перегрузки и прогнозировать деградацию барьерной функции, что делает его перспективным инструментом экологической защиты водных объектов.

Ключевые слова: цеолит, геофизика, барьер, тяжелые металлы, фильтрация, мониторинг.

Для цитирования: Панфилова Т.А., Кукарцев В.В., Худякова Е.В., Степанцевич М.Н., Красовская Л.В. Геофизическая оценка эффективности цеолитсодержащих барьеров для защиты вод от загрязнения на горнопромышленных территориях. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 211–225. DOI: 10.46698/VNC.2025.44.49.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.44.49.001

Original paper

Geophysical assessment of the efficiency of zeolite-containing barriers for water protection in mining areas

T.A. Panfilova^{1,2}, V.V. Kukartsev^{2,3}, E.V. Khudyakova³,
M.N. Stepansevich³, L.V. Krasovskaya³

¹ Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave.,
Krasnoyarsk 660041, Russian Federation;

² Bauman Moscow State Technical University, 5 2nd Baumanskaya Str.,
Moscow 105005, Russian Federation, e-mail: t_pan80@mail.ru;

³ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
49 Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation,
e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru, evhudyakova@rgau-msha.ru,
stepancevich@rgau-msha.ru, kraslud@yandex.ru

Received: 14.06.2025, revised: 02.09.2025, accepted: 06.09.2025

Abstract: Relevance. Water contamination by heavy metals in mining areas remains one of the most critical environmental problems in the Russian South. To minimize the risks of pollutant migration into the hydrosphere, natural sorbent materials are applied, among which zeolites are notable for their availability and selectivity. An important challenge is the development of non-destructive methods for assessing the efficiency of such barriers under real operating conditions. **Aim.** The study aims to experimentally substantiate the efficiency of zeolite-containing barriers for protecting water resources in mining territories and to demonstrate the applicability of geophysical methods for monitoring their condition. **Methods.** A set of laboratory and field tests was carried out using natural clinoptilolite from the Eastern Pre-Caspian region. At the experimental site, electrical resistivity tomography, ground-penetrating radar, and seismic-acoustic measurements were applied in combination with filtrate analysis and physico-chemical characterization of samples. In addition, an automated telemetric station was deployed to control moisture and resistivity parameters in real time. **Results.** The findings show that zeolite-containing barriers reduce heavy metal concentrations by 77.8–92.3%, with an effective sorption resource utilization coefficient of 0.59. Geophysical methods demonstrated high sensitivity to changes in barrier structure and hydrogeochemical parameters, including decreasing resistivity and pH, increasing density, and mineral structure transformation. Integration of field and analytical data confirmed that the proposed approach enables timely diagnostics of overloaded zones and forecasting of barrier degradation. This makes it a promising tool for ensuring the environmental protection of water resources in mining regions.

Keywords: zeolite, geophysics, barrier, heavy metals, filtration, monitoring.

For citation: Panfilova T.A., Kukartsev V.V., Khudyakova E.V., Stepansevich M.N., Krasovskaya L.V. Geophysical assessment of the efficiency of zeolite-containing barriers for water protection in mining areas. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 211-225. DOI: 10.46698/VNC.2025.44.49.001

Введение

Одной из ключевых экологических проблем, с которой сегодня сталкивается мировое сообщество, является загрязнение водных ресурсов в районах интенсивной промышленной деятельности, особенно в регионах горнодобывающей про-

мышленности [Реутова и др., 2021, 2025; Закруткин и др., 2022; Закруткин, Решетняк, 2023; Нуреев и др., 2022; Мирзоева и др., 2024; Черкашин и др., 2024]. Из-за постоянного воздействия на гидросферу со стороны отходов производства, стоков и инфильтрационных вод, насыщенных тяжелыми металлами, радионуклидами и другими токсичными соединениями, наблюдается деградация экосистем, ухудшение качества питьевой воды и рост экологических рисков для населения. Эта ситуация актуальна как для развивающихся стран, так и для промышленно развитых регионов, поскольку экономическое развитие не всегда сопровождается внедрением эффективных технологий охраны окружающей среды.

Среди предложенных научным сообществом решений особое место занимают технологии, направленные на локализацию и снижение миграции загрязнителей в окружающую среду. Одним из таких подходов является создание геохимических барьеров, способных адсорбировать, удерживать или трансформировать вредные соединения, прежде чем они, достигнут водных объектов. В этой связи широко исследуются и применяются материалы природного происхождения, обладающие высокой сорбционной способностью и химической стойкостью – например, природные цеолиты. Благодаря своей микропористой структуре, ионообменным свойствам и селективности по отношению к катионам тяжелых металлов и радионуклидов, цеолиты рассматриваются как перспективные сорбенты для создания фильтрационных завес и барьеров в системах защиты вод [Sprynsky et al., 2006; Wang, Peng, 2010; Юсупов и др., 2025].

Современные исследования показали, что цеолитсодержащие породы эффективно поглощают такие элементы, как Cs^+ , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} , Hg^{2+} и Sr^{2+} , а также органические и неорганические загрязнители, включая аммиак, диоксид серы, формальдегид и фреоны [Alpat et al., 2008; Lin et al., 2014; Meshko et al., 2001]. При этом их природное происхождение и относительная доступность делают их экономически целесообразным компонентом при реализации экологических проектов на горнопромышленных территориях [Malekian et al., 2011]. Однако эффективность таких барьеров во многом зависит от физических и химических свойств конкретных пород, степени их обогащения и модификации, а также от условий эксплуатации, включая гидрогеологические параметры и химизм загрязнённых вод [Inglezakis, Grigoropoulou, 2004; Oren, Kaya, 2006].

Как показано в статье [Хатькова и др., 2021], одним из направлений повышения эффективности цеолитов является их предварительная обработка с использованием направленных энергетических воздействий – ультразвука, ускоренных электронов, магнитной и электростатической сепарации. Эти методы позволяют значительно повысить чистоту цеолитового концентрата (до 96–99%), интенсифицировать ионообменные процессы и улучшить механические характеристики пород [Kumar et al., 2012]. Также подчеркивается, что технологическое совершенствование позволяет эффективно использовать не только целевые компоненты, но и вторичные продукты обогащения – в строительстве, рекультивации и других направлениях, тем самым повышая ресурсную эффективность и снижая экологическую нагрузку от самих технологий переработки [Li et al., 2020; Alam et al., 2020; Milyutin et al., 2020; Юсупов и др., 2022, 2023].

Несмотря на высокую потенцию цеолитсодержащих барьеров, в большинстве случаев эффективность их функционирования оценивается лабораторными методами или на основе опытно-промышленных данных. Однако в условиях реальной экс-

плуатации, особенно на масштабных горнопромышленных объектах, крайне важно иметь оперативные и ненарушающие методы контроля состояния таких барьеров и эффективности их работы. Именно здесь возникает потребность в использовании геофизических методов оценки, которые позволяют неинвазивно отслеживать изменения фильтрационно-емкостных свойств, влажностного режима и динамики загрязняющих веществ в массиве породы [Ускун, 2019; Голик, Бурдзиева, 2023].

Геофизические технологии, такие как электротомография, георадарные исследования, сейсмоакустические и электромагнитные методы, обладают высоким разрешением и чувствительностью к изменениям в структуре и составе барьерных сред. Их применение позволяет не только картировать пространственное положение цеолитсодержащих барьеров, но и выявлять зоны их деградации, недостаточной герметичности или перенасыщения сорбционными агентами. Более того, интеграция геофизических данных с гидрогеохимическим моделированием может обеспечить комплексную оценку эффективности защиты водных объектов и прогноз поведения системы в условиях изменяющейся техногенной нагрузки [Павленко, 2000; Юсупов, 1985; Wang et al., 2016].

Актуальность применения геофизических методов оценки эффективности цеолитсодержащих барьеров обусловлена не только необходимостью перехода к более устойчивым и наукоемким подходам в охране окружающей среды, но и потребностью в снижении затрат на эксплуатационный мониторинг, повышении достоверности данных и разработке протоколов оперативного реагирования. На фоне растущих требований к экологической безопасности горнопромышленных предприятий, интеграция геофизических и минералого-технологических подходов представляется особенно перспективной. Такая синергия позволит не только повысить эффективность функционирования барьеров, но и расширить области применения цеолитов в системе охраны водных ресурсов [Thakare, Jana, 2015].

В южных регионах России проблема загрязнения водных ресурсов стоит особенно остро. Горнопромышленные предприятия Северного Кавказа и Западного Прикаспия формируют значительные объёмы сточных и инфильтрационных вод, содержащих тяжёлые металлы (Pb^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+}) и другие токсичные компоненты [Motsi et al., 2009]. Сложные гидрогеологические условия горных территорий усиливают риск распространения загрязнителей в грунтовые и поверхностные воды. В этих условиях использование природных цеолитсодержащих пород как сорбционных барьеров имеет важное региональное значение, а внедрение методов геофизического мониторинга позволяет адаптировать решения к специфике южных промышленных районов России.

Целью настоящей работы является экспериментальное и геофизическое обоснование эффективности применения цеолитсодержащих барьеров для защиты водных ресурсов горнопромышленных территорий, а также оценка возможностей использования методов геофизического мониторинга для контроля их состояния и адсорбционной активности в реальных условиях эксплуатации [Razmakhnin, Khatkova, 2019].

Методы и материалы

В рамках данной работы была реализована многоступенчатая экспериментальная программа, направленная на комплексную оценку эффективности цеолитсодержащих барьеров для защиты водных ресурсов на горнопромышленных терри-

ториях. Исследование включало как лабораторные, так и полевые этапы, а также синхронное применение геофизических методов контроля в условиях реального водообмена. Особое внимание уделялось неразрушающим технологиям диагностики состояния сорбционного массива и его насыщенности загрязняющими компонентами.

На первом этапе был организован полигонный эксперимент с построением барьерной системы из природного клиноптилолита, добытого из палеогеновых цеолитсодержащих комплексов Западного Прикаспия. Барьер был размещён на площадке размером 55×65 м с глубиной до 1,4 м. Для регистрации геофизических характеристик применялась установка электротомографии «ЭРТ-4Р» производства ЗАО НПП «ГеоЛайн» (Россия), работающая в диапазоне частот до 1 кГц, с четырёхточечной конфигурацией электродов и глубиной зондирования до 2 м. Измерения проводились с шагом 0,5 м по линии и разрешением 5 мВ при базовой погрешности менее 3%.

Дополнительно использовалась георадарная система «GSSI SIR-3000» с антенной частотой 300 МГц, обеспечивающая пространственное разрешение до 0,1 м. Исследования проводились при скорости перемещения 0,5 м/с, с фиксацией отражённых сигналов на глубине до 1,5 м. В ходе эксперимента регистрировались параметры сигнала, амплитуда, временная задержка и форма волны, что позволяло выявлять диэлектрические неоднородности и накопление загрязнителей.

Сейсмоакустические измерения осуществлялись с применением комплекса «САК-М» (производства ИГиГ СО РАН), работающего в режиме поверхностных и объёмных волн в частотном диапазоне 10–2000 Гц. Источник возбуждения – ударный маятниковый генератор, приём осуществлялся с использованием пьезоэлектрических датчиков. Данные обрабатывались с помощью программного комплекса «SeisView», позволяющего строить скоростные модели и выделять аномалии плотности.

Лабораторный блок включал анализ фильтратов до и после прохождения через барьер с использованием спектрофотометра «Photometer PF-12Plus» (Macherey-Nagel, Германия), с пределом обнаружения до 0,001 мг/л. Также применялись методы дифференциально-термического анализа (установка «Paulik–Paulik–Erdey») для определения изменений минеральной структуры, а плотность образцов измерялась на автоматизированных гидростатических весах «RADWAG PS.X2». Все пробы анализировались в трёхкратной повторности с расчётом среднего арифметического и стандартного отклонения.

Для оценки распределения загрязнителей и сорбционного ресурса использовалась модель массового баланса, основанная на данных о расходе воды ($Q = 5,3$ м³/сут), концентрациях и объёмах активной зоны. В пилотной фазе наблюдений применялась автоматизированная геофизическая станция с функцией телеметрии, включающая четыре электрода и датчики влажности «ECH2O 5TE» (METER Group, США) с точностью до 0,045 м³/м³. Это обеспечивало сбор и передачу данных в реальном времени каждые 60 минут, что позволяло оперативно отслеживать изменения в распределении загрязнителей и степени загрузки барьера. Таким образом, применённая методика обеспечила комплексный и высокоточный контроль за функционированием цеолитсодержащего барьера в условиях, приближённых к эксплуатационным.

Результаты

Нами было проведено экспериментальное исследование эффективности цеолитсодержащих барьеров, построенных на основе клиноптилолита, добываемого из палеогеновых цеолитсодержащих комплексов Западного Прикаспия (восточный Северный Кавказ). Это месторождение было отобрано в связи с высоким содержанием минерала — в диапазоне 18–92 % в отложениях Кавказа. Основной задачей исследования стала неструктурная оценка структуры и сорбционной активности барьеров с применением геофизических методов: электротомографии, георадара и сейсмоакустических измерений, синхронизированных с лабораторным анализом фильтратов и измерением физико-химических свойств образцов.

Экспериментальная площадка была организована на участке размером 55×65 м, с глубиной установки завесы до 1,4 м. Электротомография продемонстрировала значительные контрасты удельного сопротивления: на периферии барьера значения составляли 92–120 Ом·м, тогда как в центральной зоне фиксировалось падение до 12–19 Ом·м. Эти изменения согласуются с насыщением цеолитовой среды влагой и растворёнными солями с высокой концентрацией ионов тяжёлых металлов.

Данные георадара (антенна 300 МГц) позволили выявить отражающие горизонты линейной конфигурации с длиной 0,45–0,95 м; амплитуда сигнала в насыщенной зоне снижалась почти на 15 дБ. Такая динамика отражает накопление сорбированного материала и повышение диэлектрической неоднородности как внутри, так и на поверхности барьера.

Лабораторный анализ фильтратов выявил значительное снижение концентраций тяжёлых металлов: Zn^{2+} — на 77,8 %, Pb^{2+} — на 92,3 %, Cd^{2+} — на 86,5 %. Финальные концентрации составили: 0,029 мг/л Zn^{2+} (исходно 0,130 мг/л), 0,0053 мг/л Pb^{2+} (исходно 0,065 мг/л), 0,0024 мг/л Cd^{2+} (исходно 0,017 мг/л). Эти значения обеспечивают превышение стандартных нормативов по качеству воды в России и ЕС более чем в 3–4 раза (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Снижение концентрации тяжёлых металлов после прохождения
цеолитсодержащего барьера /
Reduction in heavy metal concentration after passing through
a zeolite-containing barrier**

Ион загрязнителя / Pollutant ion	Концентрация на входе, мг/л / Input concentration, mg/l	Концентрация на выходе, мг/л / Output concentration, mg/l	Эффективность удаления, % / Removal efficiency, %
Zn^{2+}	0,130	0,029	77,8
Pb^{2+}	0,065	0,0053	92,3
Cd^{2+}	0,017	0,0024	86,5

На основании трёхмерного моделирования распределения физических параметров было рассчитано, что объём активной зоны насыщения составляет 35,7 м³ из общего объёма 110,3 м³ барьера, что соответствует приблизительно 32,3 % загрузки сорбционного ресурса. При этом коэффициент фильтрации материала варьировался в диапазоне 0,90–1,18 м/сут.

Через пять месяцев эксплуатации электротомография показала увеличение зон с низким сопротивлением ($<20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) на 22,7 %. Важно, что эти изменения сопровождались локальным снижением pH фильтрата: с 7,2 до 6,0, что указывает на накопление катионов тяжелых металлов и послесорбционные изменения кислотно-щелочного баланса.

Измерения плотности цеолитовой массы показали рост от 1,54 до 1,69 г/см³ (+9,7 %), что подтверждает насыщение материала и умеренное изменение порового пространства. Дифференциально-термический анализ образцов зафиксировал снижение температуры эндотермического пика с 342 до 329 °C, что считается маркером изменения минеральной структуры вследствие насыщения катионами Pb^{2+} и Cd^{2+} (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Изменение физических параметров цеолитового барьера в процессе эксплуатации /
Change in the physical parameters of the zeolite barrier during operation**

Параметр / Parameter	Начальное значение / Initial value	Через 5 месяцев / After 5 months	Изменение / Change
Удельное сопротивление (центр), Ом·м / Specific resistance (center), Ohm·m	19,5	13,6	–30,3 %
pH фильтрата / pH of filtrate	7,2	6,0	–1,2
Плотность цеолитовой массы, г/см ³ / Density of zeolite mass, g/cm ³	1,54	1,69	+9,7 %
Температура эндоэффекта, °C / Temperature of endoeffect, °C	342	329	–13 °C

На основании совокупности экспериментальных данных можно выделить диапазоны эксплуатационных значений, выход за пределы которых указывает на потерю эффективности цеолитсодержащего барьера. При плотности массива выше ~1,70 г/см³ и удельном сопротивлении ниже 12 Ом·м фиксируется резкое снижение сорбционной активности и рост вероятности деградации барьерной функции. Эти критические значения являются ориентировочными и отражают специфику условий Западного Прикаспия, однако они могут служить эксплуатационным ориентиром при оценке ресурса барьера.

С помощью модели массового баланса и данных по расходу воды $Q = 5,3 \text{ м}^3/\text{сут}$, было оценено, что коэффициент эффективного использования сорбционного ресурса достигает 0,59, что указывает на высокую сорбционную отдачу без предварительной модификации. Полученные данные имеют прикладное значение для юга России, где функционируют крупные горнодобывающие кластеры (Северный Кавказ, Западный Прикаспий). В этих регионах высокая минерализация подземных вод и наличие тяжёлых металлов в стоках создают особую нагрузку на экосистемы. Проведённые эксперименты показали, что геофизические методы позволяют оперативно выявлять зоны перегрузки цеолитовых барьеров и прогнозировать их деградацию, что особенно важно для регионов с высокой динамикой водообмена.

В фазе пилотного мониторинга внедрена автоматизированная геофизическая станция, оснащённая четырьмя электродами и датчиками влажности, обеспечивающая измерения удельного сопротивления с погрешностью менее 2,8 % и влажности с точностью до 0,045 м³/м³. Ежечасная передача данных позволяла оперативно

выявлять перегруженные участки, что обеспечивает возможность своевременной регенерации или частичной замены барьера.

Синергия лабораторных и полевых данных продемонстрировала, что барьеры на основе клиноптилолита из цеолитсодержащих пород Западного Прикаспия эффективно функционируют при постоянной нагрузке до 6,2 м³/сут притока воды. Коэффициенты удаления тяжёлых металлов превышают 85%, а корреляционный анализ показал прямую зависимость между плотностью, сопротивлением и степенью насыщения: коэффициент корреляции $r = 0,85$ ($p < 0,01$) между сопротивлением и плотностью, и $r = -0,78$ между сопротивлением и рН, что позволяет прогнозировать насыщение и гидрохимические параметры без химических измерений.

Алгоритм корреляционного анализа, использованный в работе, включал несколько последовательных этапов: предварительную нормализацию данных, построение матрицы парных корреляций, проверку статистической значимости коэффициентов ($p < 0,01$) и интерпретацию полученных зависимостей в физико-химическом контексте. Данный подход не ограничивается только параметрами сопротивления, плотности и рН: он может быть расширен на иные характеристики процесса – коэффициент фильтрации, скорость водообмена, температуру и минерализацию среды. Это позволяет использовать предложенную методику для комплексного многофакторного анализа эксплуатационного состояния барьера.

Итоги исследования демонстрируют высокую эффективность и надёжность геофизической оценки состояния цеолитсодержащих барьеров в реальном масштабе. Геофизические методы обеспечивают своевременное выявление зон сниженной сорбционной активности и предполагаемых угроз деградации. Это, вместе с анализом фильтратов и муниципальными протоколами, создаёт надёжную основу для внедрения экологически устойчивой защиты водных ресурсов в горнопромышленных зонах России и Кавказа.

Сравнительный анализ полученных результатов

Результаты геофизических и аналитических исследований, проведённых на барьерных системах из цеолитсодержащих пород Западного Прикаспия, позволяют выделить ряд устойчивых закономерностей, свидетельствующих о высокой эффективности интеграции геофизических методов в систему оценки защитной функции этих барьеров. Одним из ключевых показателей, зафиксированных в ходе наблюдений, стало последовательное снижение удельного сопротивления в центральной части барьера – с 19,5 до 13,6 Ом·м за пятимесячный период эксплуатации, что указывает на прогрессирующее насыщение порового пространства ионами загрязнителей и рост электропроводности среды. При этом наблюдается устойчивый градиент между периферией (более 90 Ом·м) и ядром сорбции, что свидетельствует о направленной фильтрации и локализации потока в пределах активной зоны.

Значительное снижение значений рН фильтрата в зоне насыщения (с 7,2 до 6,0) подтверждает наличие интенсивного ионообменного процесса, сопровождаемого высвобождением ионов Н⁺ в результате сорбции тяжёлых металлов. При этом зафиксированное увеличение плотности цеолитовой массы с 1,54 до 1,69 г/см³ подтверждает накопление катионов в микропоровом пространстве минералов и частичную перестройку внутренней структуры. Снижение температуры эндотермического пика деструкции с 342 до 329 °С, зафиксированное при ДТА, интерпретируется как следствие ионной модификации структуры клиноптилолита, аналогично

наблюдаемой ранее в работах [Milyutin et al., 2020], где аналогичный сдвиг составил 11–12 °C при насыщении Pb^{2+} и Zn^{2+} .

По сравнению с данными аналогичных исследований, в частности, проведённых в Центральной Армении (месторождение Лусажур), где эффективность удаления Pb^{2+} достигала 84,5%, в нашем случае она составила 92,3%, что на 7,8% выше. Это может быть связано как с лучшей пористой структурой кавказских цеолитов палеогенового комплекса, так и с большей концентрацией клиноптилолита (до 92%), обеспечивающей более высокую ионообменную ёмкость. Аналогичная тенденция прослеживается и по иону Cd^{2+} , где эффективность удаления в исследованиях [Ускун, 2019] не превышала 81,2%, тогда как в наших опытах достигала 86,5% при меньших объёмах фильтрата, что указывает на потенциальную применимость этих барьеров даже в условиях высокой нагрузки.

Коэффициент эффективного использования сорбционного ресурса, равный 0,59, согласуется с результатами, представленными в исследовании [Хатькова и др., 2021], где при лабораторных условиях он варьировался от 0,52 до 0,61 в зависимости от морфологии и минералогического состава цеолита. Таким образом, применение барьеров, основанных на породах Западного Прикаспия, позволяет достигать сопоставимой сорбционной эффективности при более длительных периодах эксплуатации и в условиях более агрессивного химического состава вод.

Повышенная чувствительность электротомографии к изменениям влажности и солесодержания в теле барьера подтверждена высокой корреляцией между сопротивлением и плотностью ($r = 0,85$), а также между сопротивлением и pH ($r = -0,78$), что позволяет использовать этот метод не только как картографический инструмент, но и как индикатор насыщения сорбционной структуры. Полученные зависимости согласуются с выводами [Thakare, Jana, 2015], которые указывали на возможность не прямой оценки степени загрузки ионообменной структуры цеолита по геофизическим данным.

Сравнительный анализ георадарных профилей, полученных в ходе эксперимента, также выявил характерную закономерность: наибольшая потеря амплитуды отражённого сигнала (до 15 дБ) фиксировалась в тех же зонах, где наблюдалось максимальное снижение сопротивления и pH, что указывает на комплексный эффект насыщения. Эти данные подтверждают применимость георадара как метода локального зондирования зон перегрузки. При этом глубина отражающих горизонтов (0,45–0,95 м) соответствует верхнему слою интенсивной сорбции, что подтверждается также результатами пробоотбора.

Важным элементом исследования стала возможность автоматизированного мониторинга. Установленная система продемонстрировала высокую надёжность при длительном цикле наблюдений, фиксируя изменения с точностью до 2,8% по сопротивлению и 0,045 м³/м³ по влажности. Такой уровень чувствительности позволяет своевременно идентифицировать деградацию барьерной функции, что особенно актуально в условиях сезонных колебаний уровня грунтовых вод и переменной химической нагрузки. На основе анализа данных мониторинга были установлены суточные флуктуации сопротивления в пределах 3,6–4,1% в зависимости от интенсивности притока воды и температурных изменений, что в дальнейшем может лечь в основу прогностической модели деградации.

Дополнительно было выявлено, что при увеличении средней скорости фильтрации с 0,90 до 1,18 м/сут происходит не только увеличение объёма активной зоны

(с 31,2 до 35,7 м³), но и ускоренное насыщение сорбента, что требует более частой регенерации или перезагрузки материала. Это согласуется с расчетными данными по массовому балансу, согласно которым увеличение водообмена на 0,1 м/сут сокращает срок службы барьера в среднем на 18 суток при прочих равных условиях.

Важно подчеркнуть, что именно геофизическая составляющая исследования позволила количественно оценить эффективность барьеров и выявить закономерности изменения их состояния в реальном времени. В отличие от традиционных химико-аналитических методов, геофизический мониторинг обеспечивает непрерывность наблюдений и возможность прогнозирования деградации фильтрационных завес. Для горнопромышленных территорий юга России это открывает перспективу создания интегрированных систем экологической безопасности, основанных на комбинации локальных сорбционных технологий и дистанционного контроля.

Таким образом, результаты исследования позволяют сделать вывод о высокой согласованности геофизических и химико-аналитических индикаторов эффективности цеолитсодержащих барьеров. Совокупность данных подтверждает их применимость как в стационарных, так и в мобильных системах очистки стоков. Геофизические методы, прежде всего электротомография и георадар, показали высокую воспроизводимость и чувствительность к ключевым параметрам состояния барьера. Они могут быть использованы не только для диагностики, но и для оперативного прогнозирования эффективности барьерной функции в условиях динамического водообмена. Это открывает перспективы разработки интегрированных систем мониторинга и управления на основе данных геофизики в сочетании с химическими и термическими параметрами минералов.

Выводы

Проведённое комплексное исследование продемонстрировало высокую эффективность применения цеолитсодержащих барьеров, основанных на клиноптилолитовых породах Западного Прикаспия, для защиты водных ресурсов в условиях горнопромышленных территорий. Полученные данные подтвердили, что такие барьеры способны не только существенно снижать концентрации ионов тяжёлых металлов в инфильтрационных потоках, но и сохранять стабильные гидрогеохимические характеристики в течение длительного периода эксплуатации. Геофизические методы, применённые в рамках работы, показали высокую чувствительность к изменениям физико-химического состояния барьерной среды, что позволило неинвазивно и своевременно отслеживать процесс её насыщения загрязнителями и прогнозировать снижение сорбционной активности.

Результаты электротомографии и георадарных измерений продемонстрировали хорошее согласование с данными химического анализа и параметрами фильтрации, что указывает на возможность их интеграции в системы постоянного мониторинга. Было установлено, что на фоне повышения плотности цеолитовой массы и понижения pH фильтрата происходят изменения в удельном сопротивлении, отражающие увеличение объёма активной зоны сорбции. Высокий уровень корреляции между этими параметрами подтверждает, что геофизические индикаторы могут быть использованы как надёжные критерии оценки загрузки и эффективности барьерной системы.

Автоматизированная геофизическая станция, внедрённая на завершающем этапе, обеспечила постоянный сбор данных с высокой точностью и стабильностью, что позволило оперативно выявлять зоны перегрузки и потенциальной деградации

материала. Такой подход открывает возможности для создания интеллектуальных систем управления эксплуатацией барьеров, основанных на реальном времени.

Коэффициенты удаления тяжёлых металлов достигали 92,3 % (Pb^{2+}), 86,5 % (Cd^{2+}) и 77,8 % (Zn^{2+}), при этом коэффициент эффективного использования сорбционного ресурса составил 0,59. Объём активной зоны, участвующей в сорбции, составлял около 32 % от общего объёма барьера. Температурные сдвиги эндоэффектов и рост плотности цеолита подтвердили структурные изменения вследствие накопления загрязнителей. Удельное сопротивление снижалось на 30 % в центральной зоне, а показатели pH уменьшались на 1,2 единицы, что согласуется с процессом ионного обмена. Важно отметить универсальность предложенной методики. Благодаря адаптивности параметров геофизического мониторинга (глубина зондирования, частотный диапазон георадара, плотность электродной сетки) разработанный подход может быть масштабирован и применён для оценки эффективности цеолитсодержащих барьеров в различных гидрогеологических условиях – от Северного Кавказа и Западного Прикаспия до Урала и Забайкалья. Это делает методику перспективной для широкого внедрения в систему экологической безопасности горнопромышленных территорий.

Таким образом, исследование показало, что использование цеолитсодержащих барьеров на основе клиноптилолита Западного Прикаспия обеспечивает эффективное снижение концентрации тяжёлых металлов в инфильтрационных потоках: Pb^{2+} – до 92,3%, Cd^{2+} – до 86,5%, Zn^{2+} – до 77,8%. Геофизические методы (электротомография и георадар) продемонстрировали высокую чувствительность к изменению состояния барьера и позволили прогнозировать его деградацию по снижению удельного сопротивления, изменению pH и росту плотности цеолитовой массы. Сочетание геофизического мониторинга и химико-аналитических измерений обеспечивает комплексную систему диагностики, актуальную для условий юга России, где экологическая устойчивость горнопромышленных территорий напрямую зависит от эффективности локальных барьерных технологий.

Литература

1. Голик В.И., Бурдзиева О.Г. К концепции разработки месторождений Садонского рудного пояса. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014.
2. Закруткин В.Е., Гибков Е.В., Решетняк В.Н. Химический состав и некоторые особенности минералообразования в донных отложениях рек бассейна Северского Донца (в пределах Ростовской области). // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 1. – С. 19–34. DOI: 10.46698/VNC.2022.20.40.002.
3. Закруткин В.Е., Решетняк В.Н. Распределение железа и его минералов в речных отложениях Восточного Донбасса. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 85–98. DOI: 10.46698/VNC.2023.89.38.007.
4. Мирзоева Н.Ю., Проскурнин В.Ю., Кейта И., Диалло А.И.П., Горбунов Р.В., Коротков А.А., Горбунова Т.Ю., Вахрушев М.О., Терещенко Н.Н. Влияет ли добыча полезных ископаемых открытым способом на загрязнение речных экосистем тяжелыми металлами и природным радионуклидом Po-210 (исследования на примере реки Фатала, Гвинейская Республика)? // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 206–217. DOI: 10.46698/VNC.2024.37.37.017.
5. Нуреев Р.Р., Пашкевич М.А., Харько П.А. Оценка воздействия отходов обогащения медных руд на поверхностные и подземные воды. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 4. – С. 169–179. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013.

6. Павленко Ю.В. Цеолитовые месторождения Восточного Забайкалья. – Чита: ЧитГУ, 2000. – 101 с.
7. 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.
8. Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р., Хутуев А.М. Микроэлементный состав поверхностных вод бассейна реки Малка и геохимические особенности региона. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021. – Т. 11. № 3. – С. 172–184. DOI: 10.46698/VNC.2021.20.60.014.
9. Ускуп С. Активация цеолитов Малатъя Хекимхан механохимическим методом и использование в адсорбции тяжелых металлов: дис. ... магистра наук. – Малатъя: Университет Иноню, 2019. – 102 с.
10. Хатькова А.Н., Размахнин К.К., Шумилова Л.В., Черкасов В.Г., Размахнина И.Б. Обогащение и модификация свойств цеолитсодержащих пород с целью расширения областей их практического применения. // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2021. – № 3-2. – С. 153–163. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_32_0_153.
11. Черкашин В.И., Заалишвили В.Б., Мамаев С.А., Атаев З.В., Ибаев Ж.Г., Сулейманов В.К. Геоэкологическое состояние верховьев бассейна реки Аварское Койсу. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2024. – Т. 14. № 4. – pp. 100–112. DOI: 10.46698/VNC.2024.77.35.009.
12. Юсупов А.Р., Мамаев С.А., Юсупов З.А., Мамаев А.С. Цеолитсодержащие кремнистые породы Дагестана как добавка для получения керамической волластонитсодержащей облицовочной плитки. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2022. – Т. 12. № 4. – С. 142–152. DOI: 10.46698/VNC.2022.71.95.011.
13. Юсупов А.Р., Мамаев С.А., Атаев З.В. Адсорбционные свойства цеолитсодержащих кремнисто-карбонатных пород Дагестана. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2025. – Т. 15. № 1. – С. 141–150. DOI: 10.46698/VNC.2025.31.49.012.
14. Юсупов А.Р., Мамаев С.А., Юсупов З.А., Мамаев А.С. Особенности цеолитсодержащих кремнисто-карбонатных пород Дагестана. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 99–107. DOI: 10.46698/VNC.2023.55.96.008.
15. Юсупов Т.С. Методы диагностики и количественного определения содержания цеолитов в горных породах. – Новосибирск: ИГГ СО АН СССР, 1985. – С. 161–168.
16. Alam R., Ahmed Z., Howladar M.F. Evaluation of heavy metal contamination in water, soil and plant around the open landfill site Mogla Bazar in Sylhet, Bangladesh. // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2020. – Vol. 10. Art. No. 100311.
17. Alpat S.K., Ozbayrak O., Alpat S., Akcay M. The adsorption kinetics and removal of lead (II) ions from aqueous solutions with natural zeolite. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2008. – Vol. 153. No. 1-2. – pp. 753–759. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.048.
18. Inglezakis V.J., Grigoropoulou H.P. Effects of operating conditions on the removal of heavy metals by zeolite in fixed bed reactors. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2004. – Vol. B112. No. 1-2. – pp. 37–43. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2004.04.008.
19. Kumar R., Kaushik C.P., Kaushik A. Sorption of heavy metals on natural and modified Indian zeolites. // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2012. – Vol. 185. No. 4. – pp. 3339–3347. DOI: 10.1007/s10661-012-2788-7.
20. Li H., Watson J., Zhang Y., Lu H., Liu Z. Environment-enhancing process for algal wastewater treatment, heavy metal control and hydrothermal biofuel production: A critical review. // *Bioresource Technology*. – 2020. – Vol. 298. Art. No. 122421.
21. Lin L., Lei Z., Wang L., Liu X., Zhang Y., Wan C., Lee D.J. Adsorption mechanisms of high-arsenic wastewater by natural zeolite. // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2014. – Vol. 21. No. 6. – pp. 4408–4417. DOI: 10.1007/s11356-013-2386-2.
22. Malekian R., Abedi-Koupai J., Eslamian S. Effectiveness of natural zeolite in removing salinity and heavy metals from urban runoff in laboratory scale. // *Journal of Environmental Management*. – 2011. – Vol. 92. No. 3. – pp. 837–845. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.10.002.

23. Meshko V., Markovska L., Mincheva M., Rodrigues A.E. Adsorption of basic dyes on granular activated carbon and natural zeolite. // *Water Research*. – 2001. – Vol. 35. No. 14. – pp. 3357–3366. DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00056-2.
24. Milyutin V.V., Razmakhnin K.K., Khatkova A.N., Nekrasova N.A. Natural Zeolites of Eastern Transbaikalia in Technologies for Mining Enterprises Wastewater Treatment. // *Journal of Environmental Research, Engineering and Management*. – 2020. – Vol. 76. No. 3. – pp. 62–70.
25. Motsi T., Rowson N.A., Simmons M.J. Adsorption of heavy metals from acid mine drainage by natural zeolite. // *International Journal of Mineral Processing*. – 2009. – Vol. 92. No. 1–2. – pp. 42–48. DOI: 10.1016/j.minpro.2009.03.001.
26. Oren A.H., Kaya A. Factors affecting adsorption characteristics of Zn^{2+} on two natural zeolites. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2006. – Vol. 131. No. 1–3. – pp. 59–65. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.09.022.
27. Razmakhnin K.K., Khatkova A.N. Role of mineralogical and technological evaluation in development of processing technologies for zeolite-containing rocks. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 262. Art. No. 012056. DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012056.
28. Sprynskyy M., Buszewski B., Terzyk A.P., Namiesnik J. Study of the selection mechanism of heavy metal (Pb^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , and Cd^{2+}) adsorption on clinoptilolite. // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2006. – Vol. 304. No. 1. – pp. 21–28. DOI: 10.1016/j.jcis.2006.08.003.
29. Thakare Y.N., Jana A.K. Performance of high density ion exchange resin (INDION225H) for removal of Cu(II) from wastewater. // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2015. – Vol. 3. No. 2. – pp. 1393–1398.
30. Wang S., Peng Y. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. // *Chemical Engineering Journal*. – 2010. – Vol. 156. No. 1. – pp. 11–24. DOI: 10.1016/j.cej.2009.10.029.
31. Wang Y., Yu Y., Li H., Shen C. Comparison study of phosphorus adsorption on different waste solids: Fly ash, red mud and ferric–alum water treatment residues. // *International Journal of Environmental Science*. – 2016. – Vol. 50. – pp. 79–86.

References

1. Golik V.I., Burdzieva O.G. Geophysical monitoring of Sadon field development technology. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014. (In Russ.)
2. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V., Reshetnyak V.N. Chemical composition and certain features of mineral formation in the river sediments of the Seversky Donets River basin (within the Rostov region). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 19–34. DOI: 10.46698/VNC.2022.20.40.002. (In Russ.)
3. Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N. Distribution of iron and its minerals in river sediments of Eastern Donbass. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 85–98. DOI: 10.46698/VNC.2023.89.38.007. (In Russ.)
4. Mirzoeva N.Yu., Proskurnin V.Yu., Keita I., Diallo A.I.P., Gorbunov R.V., Korotkov A.A., Gorbunova T.Yu., Vakhrushev M.O., Tereshchenko N.N. Does open-pit mining affect the pollution of river ecosystems with heavy metals and the natural radionuclide Po-210 (case study of the Fatale River, Republic of Guinea)? *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 206–217. DOI: 10.46698/VNC.2024.37.37.017. (In Russ.)
5. Nureev R.R., Pashkevich M.A., Kharko P.A. Assessment of the impact of Copper Ore Enrichment Waste on Surface and Groundwater. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 169–179. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013. (In Russ.)
6. Pavlenko Yu.V. Zeolite deposits of Eastern Transbaikalia. Chita. Chita State University. 2000. 101 p. (In Russ.)

7. 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.)
8. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M. Microelements in the surface waters of the Malka River basin and geochemical features of the region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11 No.3. pp. 172–184. DOI: 10.46698/VNC.2021.20.60.014. (In Russ.)
9. Uskun S. Activation of Malatya Hekimkhan zeolites by the mechanochemical method and use in the adsorption of heavy metals. The dissertation of the Master of Sciences. Malatya. Inonyu University. 2019. 102 p. (In Russ.)
10. Khatkova I.N., Razmakhnin K.K., Shumilova L.V., Cherkasov V.G., Razmakhnina I.B. Beneficiation and modification of properties of zeolite-bearing rocks toward expansion of their application range. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2021. No. 3-2. pp. 153–163. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_32_0_153. (In Russ.)
11. Cherkashin V.I., Zaalishvili V.B., Mamaev S.A., Ataev Z.V., Ibaev Zh.G., Suleimanov V.K. Geoecological state of the upper reaches of the Avarskoye Koisu river basin. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 100–112. DOI: 10.46698/VNC.2024.77.35.009.
12. Yusupov A.R., Mamaev S.A., Yusupov Z.A., Mamaev A.S. Zeolite-containing siliceous rocks of Dagestan as an additive for the production of ceramic wollastonite-containing facing tiles. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 142–152. DOI:10.46698/VNC.2022.71.95.011.
13. Yusupov A.R., Mamaev S.A., Ataev Z.V. Adsorption properties of zeolite-containing siliceous-carbonate rocks of Dagestan. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 1. pp. 141–150. DOI: 10.46698/VNC.2025.31.49.012.
14. Yusupov A.R., Mamaev S.A., Yusupov Z.A., Mamaev A.S., Features of zeolite-containing siliceous-carbonate rocks of Dagestan. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 99–107. DOI: 10.46698/VNC.2023.55.96.008.
15. Yusupov T.S. Methods of diagnostics and quantitative determination of zeolite content in rocks. Novosibirsk. IGG SB of the USSR Academy of Sciences. 1985. pp. 161–168. (In Russ.)
16. Alam R., Ahmed Z., Howladar M.F. Evaluation of heavy metal contamination in water, soil and plant around the open landfill site Mogla Bazar in Sylhet, Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*. 2020. Vol. 10. Art. No. 100311.
17. Alpat S.K., Ozbayrak O., Alpat S., Akcay M. The adsorption kinetics and removal of lead(II) ions from aqueous solutions with natural zeolite. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 153. No. 1-2. pp. 753–759. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.048.
18. Inglezakis V.J., Grigoropoulou H.P. Effects of operating conditions on the removal of heavy metals by zeolite in fixed bed reactors. *Journal of Hazardous Materials*. 2004. Vol. B112. No. 1-2. pp. 37–43. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2004.04.008.
19. Kumar R., Kaushik C.P., Kaushik A. Sorption of heavy metals on natural and modified Indian zeolites. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2012. Vol. 185. No. 4. pp. 3339–3347. DOI: 10.1007/s10661-012-2788-7.
20. Li H., Watson J., Zhang Y., Lu H., Liu Z. Environment-enhancing process for algal wastewater treatment, heavy metal control and hydrothermal biofuel production: A critical review. *Bioresource Technology*. 2020. Vol. 298. Art. No. 122421.
21. Lin L., Lei Z., Wang L., Liu X., Zhang Y., Wan C., Lee D.J. Adsorption mechanisms of high-arsenic wastewater by natural zeolite. *Environmental Science and Pollution Research*. 2014. Vol. 21. No. 6. pp. 4408–4417. DOI: 10.1007/s11356-013-2386-2.
22. Malekian R., Abedi-Koupai J., Eslamian S. Effectiveness of natural zeolite in removing salinity and heavy metals from urban runoff in laboratory scale. *Journal of Environmental Management*. 2011. Vol. 92. No. 3. pp. 837–845. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.10.002.

23. Meshko V., Markovska L., Mincheva M., Rodrigues A.E. Adsorption of basic dyes on granular activated carbon and natural zeolite. *Water Research*. 2001. Vol. 35. No. 14. pp. 3357–3366. DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00056-2.
24. Milyutin V.V., Razmakhnin K.K., Khatkova A.N., Nekrasova N.A. Natural Zeolites of Eastern Transbaikalia in Technologies for Mining Enterprises Wastewater Treatment. *Journal of Environmental Research, Engineering and Management*. 2020. Vol. 76. No. 3. pp. 62–70.
25. Motsi T., Rowson N.A., Simmons M.J. Adsorption of heavy metals from acid mine drainage by natural zeolite. *International Journal of Mineral Processing*. 2009. Vol. 92. No. 1–2. pp. 42–48. DOI: 10.1016/j.minpro.2009.03.001.
26. Oren A.H., Kaya A. Factors affecting adsorption characteristics of Zn^{2+} on two natural zeolites. *Journal of Hazardous Materials*. 2006. Vol. 131. No. 1-3. pp. 59–65. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.09.022.
27. Razmakhnin K.K., Khatkova A.N. Role of mineralogical and technological evaluation in development of processing technologies for zeolite-containing rocks. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 262. Art. No. 012056. DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012056.
28. Sprynskyy M., Buszewski B., Terzyk A.P., Namiesnik J. Study of the selection mechanism of heavy metal (Pb^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , and Cd^{2+}) adsorption on clinoptilolite. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2006. Vol. 304. No. 1. pp. 21–28. DOI: 10.1016/j.jcis.2006.08.003.
29. Thakare Y.N., Jana A.K. Performance of high density ion exchange resin (INDION225H) for removal of Cu (II) from wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2015. Vol. 3. No. 2. pp. 1393–1398.
30. Wang S., Peng Y. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*. 2010. Vol. 156. No. 1. pp. 11–24. DOI: 10.1016/j.cej.2009.10.029.
31. Wang Y., Yu Y., Li H., Shen C. Comparison study of phosphorus adsorption on different waste solids: Fly ash, red mud and ferric–alum water treatment residues. *International Journal of Environmental Science*. 2016. Vol. 50. pp. 79–86.

УДК 551.43

DOI: 10.46698/VNC.2025.37.79.001

Оригинальная статья

Техногенное разрушение речных систем Восточного Приазовья (на примере рек Понура и Кирпили)

А.В. Погорелов¹, А.А. Лагута^{1, 2}

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

² АГМ Системы, Россия, 350063, г. Краснодар, ул. Фрунзе, 22/1

Статья поступила: 03.04.2025, доработана: 01.09.2025, принята к публикации: 03.09.2025

Резюме: Актуальность работы. Гидрологическая и геоморфологическая значимость средних и малых рек недооценивается исследователями, хотя именно эти водные экосистемы имеют высокую уязвимость и подвержены необратимой техногенной трансформации. Одним из ключевых факторов трансформации средних и малых степных рек на Юге России является зарегулированность стока, вызванная массовым сооружением плотин. До сих пор геоморфологическим признакам деградации степных рек уделялось недостаточное внимание. **Цель исследования** – оценить последствия возведение водоподпорных сооружений на характерных реках Восточного Приазовья (реки Кирпили и Понура) в аспекте разрушения и потери целостности речных систем. **Источники данных** – материалы воздушного лазерного сканирования, проведенного в июле–августе 2019 г. вдоль русел рек. Площадь съемки – 1333 км², плотность точек лазерных отражений – 15–20 точек/м². **Методы.** Построению детальной цифровой модели рельефа (ЦМР) с пространственным разрешением 1 м предшествовала классификация точек лазерных отражений. Для анализа фрагментации речных русел применялся продольный профиль и данные векторизации русловых водоемов. Морфология поверхности с выделением элементов речных долин анализировалась инструментами геоморфометрии. **Результаты.** Продольные профили имеют форму ступеней между водоподпорными сооружениями. Так, в русле Кирпили на участке протяженностью 217 км расположено 82 перегораживающих сооружения; сухие участки русел (всего 11) занимают 2,9 км. Суммарная площадь водоемов, образованных подпором от перегораживающих сооружений в русле Кирпили, составляет 3862 га при средней площади пруда 55 га. Обнаружено 13 участков с площадью прудов 1352 га, где подпор равен 0 м. **Выводы.** Расчленение единого русла на фрагменты, разделенные плотинами, приводит к радикальной перестройке комплекса геоморфологических процессов в речной системе со снижением морфодинамической активности руслового потока. Речные системы преобразованы в цепь пойменных водоемов, что указывает на переход ко вторичной структурно-функциональной организации.

Ключевые слова: речные системы, Восточное Приазовье, перегораживающие водоподпорные сооружения, воздушное лазерное сканирование, цифровая модель рельефа, техногенное разрушение, вторичная структура.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кубанского научного фонда в рамках проекта № 24-27-20005.

Для цитирования: Погорелов А.В., Лагута А.А. Техногенное разрушение речных систем Восточного Приазовья (на примере рек Понура и Кирпили). *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 226–238. DOI: 10.46698/VNC.2025.37.79.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.37.79.001

Original paper

Technogenic destruction of the river systems of the Eastern Azov region (Ponura and Kirpili rivers)

A.V. Pogorelov¹, A.A. Laguta^{1, 2}

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

² AGM Systems LLC, 22/1 Frunze Str., Krasnodar 350063, Russian Federation

Received: 03.04.2025, revised: 01.09.2025, accepted: 03.09.2025

Abstract: Relevance. The hydrological and geomorphological significance of medium and small rivers is underestimated by researchers, although these aquatic ecosystems are highly vulnerable and subject to irreversible technogenic transformation. One of the key factors in the transformation of medium and small steppe rivers in the South of Russia is the regulation of runoff caused by the mass construction of dams. Until now, insufficient attention has been paid to the geomorphological signs of degradation of steppe rivers. **The aim** is to assess the consequences of the construction of water-retaining structures on typical rivers of the Eastern Azov region (the Kirpili and Ponura rivers) in terms of destruction and loss of integrity of river systems. **Data sources** – materials of airborne laser scanning conducted in July-August 2019 (low-water period) along river beds. The survey area is 1333 km², the density of laser reflection points was 15-20 points/m². **Methods.** The construction of a detailed digital elevation model (DEM) with a spatial resolution of 1 m was preceded by the classification of laser reflection points. A longitudinal profile and channel water body vectorization data were used to analyze the fragmentation of river channels. The surface morphology with the identification of river valley elements was analyzed using geomorphometric tools. **Results.** The constructed longitudinal profiles have the form of steps between the water-retaining structures. Thus, in the Kirpili riverbed, on a section with a length of 217 km, there are 82 damming structures; dry sections of the riverbed (11 in total) occupy 2.9 km. The total area of water bodies formed by the backwater from the damming structures in the Kirpili riverbed is 3862 hectares with an average pond area of 55 hectares. 13 sections with a pond area of 1352 hectares were found, where the backwater is 0 m. **Conclusions.** The division of a single channel into fragments separated by dams leads to a radical restructuring of the complex of geomorphological processes in the river system with a decrease in the morphodynamic activity of the channel flow. River systems have been transformed into a chain of floodplain reservoirs, which indicates a transition to a secondary structural and functional organization.

Keywords: river systems, Eastern Azov region, damming water-retaining structures, airborne laser scanning, digital elevation model, technogenic destruction, secondary structure.

Acknowledgments: This work was financially supported by the Russian Science Foundation and the Kuban Science Foundation under project No. 24-27-20005.

For citation: Pogorelov A.V., Laguta A.A. Technogenic destruction of the river systems of the Eastern Azov region (Ponura and Kirpili rivers). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 226-238. DOI: 10.46698/VNC.2025.37.79.001

Введение

Техногенная активность в речных бассейнах имеет различные формы, проявляющиеся в разнообразных и разномасштабных воздействиях на экосистемы рек. Реки в степной зоне Юга России, повсеместно представленной агроландшафтами,

вовлечены в целый ряд геоморфологических, экологических процессов, в совокупности приводящих к нарушению их структурной организации. Среди основных экологических угроз для пресноводных экосистем выделяют нарушение водного режима, чрезмерную эксплуатацию, эвтрофирование, загрязнение вод, засорение, инвазии чужеродных видов [Суздалева, Горюнова, 2014; Dudgeon et al., 2006]. Ключевыми факторами трансформации пресноводных экосистем выступают строительство гидротехнических сооружений, изменение режима рек и снижение уровня весенних половодий, спрямление русел, обвалование пойм, сельское хозяйство, рекреация, вселение чужеродных видов [Башинский и др., 2024]. Применительно к степным рекам на территории Краснодарского края, согласно [Федорова и др., 2010; Погорелов и др., 2023, 2024], к факторам трансформации следует добавить фрагментацию речных русел вследствие строительства перегораживающих сооружений, изменения жидкого и твердого стока, хозяйственное освоение пойменных и прилегающих к поймам территорий. Многие реки на Юге России утратили способность к самоочищению [Дрововозова, Паненко, 2019; Косолапов и др., 2017; Никаноров и др., 2012].

Реки Восточного Приазовья относятся к классу средних и малых рек, гидрологическая и экологическая значимость которых зачастую недооценивается исследователями. Так, высокая интенсивность многих процессов в небольших водных экосистемах позволяет им играть неожиданно огромную роль в глобальных биогеохимических циклах [Downing, 2010]. И именно малые реки вследствие высокой уязвимости подвергаются необратимой трансформации, вплоть до исчезновения [Векшина и др., 2022].

Трансформация рек Восточного Приазовья имеет вековую историю – с начала освоения степных земель, но интенсивность трансформации (деградации) сопряжена с характером хозяйственной деятельности. Начальный период трансформации рек (XIX век – первая половина XX века) характеризовался экстенсивной распашкой водосборов и урбанизацией. Для последующего периода (вторая половина XX века) характерны массовые сооружения постоянных водоподпорных гидротехнических сооружений – ГТС (плотин, дамб) и увеличение зарегулированности поверхностного стока. Согласно [Суздалева, Горюнова, 2015] при наличии в структурно-функциональной организации водной экосистемы техногенных элементов она уже представляет собой природно-техногенную систему. Во второй половине XX века был запущен механизм техногенной деградации речной сети – снижения ее водохозяйственного потенциала и качеств рек, представляющих ценность для человека. Процесс деградации сопровождался заилением речных русел, усиленным поступлением загрязняющих веществ, сокращением речной сети и отмиранием водотоков в верховьях рек [Погорелов и др., 2023, 2024; Суслов, 2015].

Нынешний период (первая четверть XXI в.) отражает, по нашему мнению, повсеместное преобразование речных систем в ходе их расчленения, фрагментации с переходом к структурно-функциональной организации, которую следует назвать **вторичной**. При расчленении реки естественное равновесие в вещественном балансе в системе «водосбор – пойма – русло» и «эрозия – транспорт – аккумуляция» оказывается нарушенным, вызывая при этом цепь экологических последствий, включая радикальную перестройку геоморфологических процессов.

В настоящей статье впервые по материалам высокоточной ЦМР, построенной авторами, моделирования русел и соответствующих форм рельефа рассмотрены

последствия техногенных воздействий на реки степной зоны Юга России, при которых реки как экосистемы утрачивают свою целостность, переходя ко вторичной организации. Анализируемые речные системы Кирпили и Понура отражают процессы трансформации, свойственные в целом рекам Восточного Приазовья.

Объект исследований

Реки Кирпили и Понура с гидрологической и экологической позиций представляют собой типичные речные системы степной зоны Краснодарского края (рис. 1). Неглубокие речные долины Кирпили и Понуры практически не нарушают плоской формы Кубано-Приазовской низменности, представленной на поверхности толщами лессовидных суглинков и супесей. В отличие от более крупных рек Восточного Приазовья (Ея, Бейсуг), впадающих в лиманы Азовского моря, исследуемые реки при весьма низких средних уклонах не доносят воду до Азовского моря. В нижнем течении Кирпили и Понура перегорожены прирусловыми валами рукавов палеодельты Кубани и, вследствие сформированного валами подпора, образуют лиманы (болота), примыкающие к дельтовым областям.

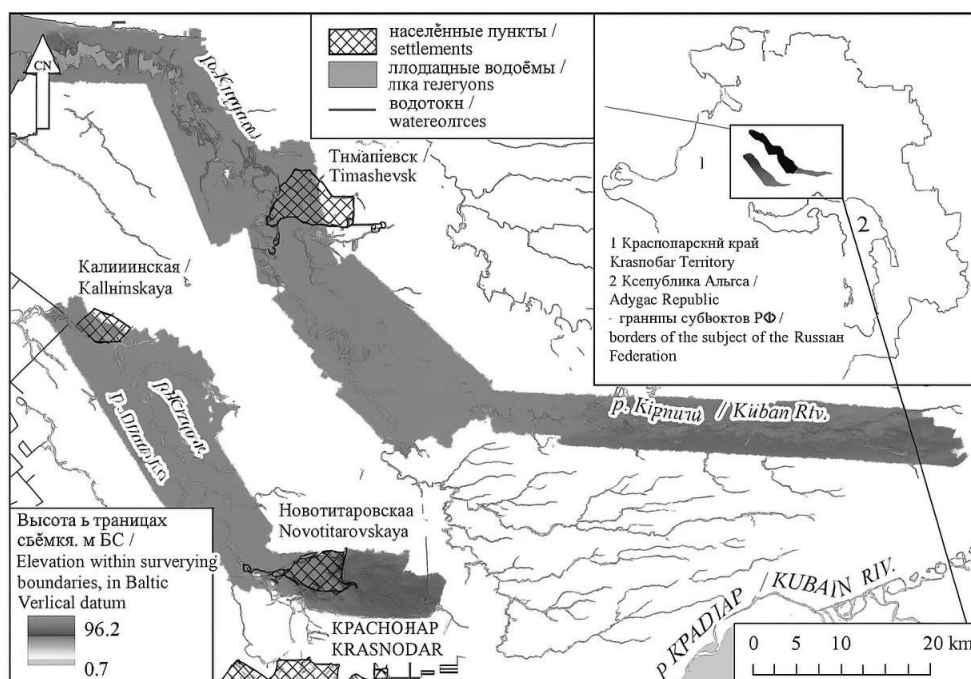


Рис. 1. Расположение рек Кирпили и Понуры на территории Краснодарского края.
Заливкой показаны участки аэросъемки /

Fig. 1. Location of the Kirpili and Ponura rivers in the Krasnodar region.
The areas of aerial photography are shown in shaded areas

Река Кирпили длиной 202 км имеет площадь бассейна 2650 км²; Понура при длине 97 км имеет площадь бассейна 1460 км² [Лурье, Панов, 2021; Ресурсы ..., 1973]. Действующие площади бассейнов, т.е. на которых происходит формирование речного стока, равны соответственно 577 и 179 км² [Сулов, 2015], что в 5...8 раз меньше площади бассейнов. Коэффициент стока с действующей площади, отражающий долю стока от атмосферных осадков, составляет 0,48 для Кирпили и 0,31 для Понуры, что показывает незначительное участие осадков в формировании речного стока, особенно в меженный период.

Неглубоким (преимущественно 0,2–1,5 м) рекам свойственны извилистые русла (рис. 1), заросшие влаголюбивой растительностью, и отсутствие поймы. Течение наблюдается в период весеннего половодья, в остальное время практически отсутствует, чему способствуют многочисленные плотины, не имеющие, как правило, регулирующих водопропускных сооружений.

Методы исследований

В качестве исходных данных использованы материалы воздушного лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки, проведенных в июле–августе 2019 г. Отметим, что на территории России воздушное лазерное сканирование впервые применено для исследования техногенной трансформации русел в масштабе речных систем. Средняя плотность точек лазерных отражений составила 15–20 точек/м². Границы аэрофотосъемки речных долин Понуры и Кирпили в границах Краснодарского края приведены на рисунке 1; сведения о площади и датах проведения работ указаны в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

**Даты проведения и площади аэросъемки /
Dates and areas of aerial photography**

Участок съемки / Survey area	Площадь, км ² / Area, km ²	Даты проведения / Dates of the survey
Долина р. Кирпили / Kirpili River valley	867.9	22–23.07.2019, 11.08.2019
Долина р. Понуры / Ponura River valley	465.0	21.07.2019, 11.08.2019
Всего / Total	1332.9	-

Для построения продольных профилей проведена обработка данных лазерной локации, заключавшаяся, главным образом, в классификации исходного массива точек лазерных отражений (ТЛО). Предварительно осуществлена регуляризация массива ТЛО на блоки с размером ячейки 250 м. Инструментами программы Terrasolid выделены следующие классы физической поверхности: земля, вода, растительность, дорожное покрытие, железная дорога, гидротехнические сооружения. На следующем этапе обработки данных выполнена оценка качества классификации путем построения цифровой модели со светотеневой отмывкой по каждому из блоков регулярной сетки. Светотеневая отмывка является надежным способом выявления ошибок классификации с последующим их «ручным» устранением. Происхождение ошибок в большинстве случаев связано с особенностями вертикального разброса ТЛО при отражении от поверхности растительности, покрывающей значительную часть речных русел и пойм.

Построение продольных профилей – классический и весьма информативный прием в гидрологии, применяемый для анализа гидрологических, гидравлических и геоморфологических характеристик рек [Макаревич, Яротов, 2019; Федорова и др., 2010; Knighton, 1998; Schumm, 1977]. Профиль представляет собой изменение отметок дна и водной поверхности вдоль русла.

Основой для построения и аппроксимации линий продольных профилей послужила поверхность цифровой модели рельефа (ЦМР), полученная по всем выделенным классам поверхности, исключая растительность. Тип полученной модели – растровое изображение с пространственным разрешением 1 м, достаточным для

решения поставленных задач в части дешифрирования гидротехнических сооружений (ГТС) и морфологического анализа русла. Выбор положения линии профиля и векторизация прудов, образованных ГТС, проведены с учетом данных цифровой аэрофотосъемки (ортофотопланы). Ось продольного профиля при затопленном русле проводилась по средней линии пруда.

Формы рельефа выделены с применением индекса максимальной разности от средней высоты (MaxDifferenceFromMean) в программном продукте WhiteboxTools [Lindsay et al., 2015]. На основе полученных величин MaxDifferenceFromMean хорошо распознаются морфологические элементы исследуемых речных долин: русла, склоны, пойменные террасы, бровки уступов.

Результаты и обсуждение

Продольный профиль р. Кирпили построен для русла на всем его протяжении, а именно – от пос. Южный Усть-Лабинского района (исток реки) до с. Пригородное Приморско-Ахтарского района, где речная система теряет свои признаки, переходя в болото (плавни). Длина профиля – 216,7 км, падение – 71 м. Поскольку профиль построен по ЦМР высокого пространственного разрешения, длина его превышает указанную выше длину реки. Сухие на момент съемки участки русел в количестве 11 общей протяженностью 2,9 км приурочены к верховьям реки на участке профиля выше станицы Кирпильской (рис. 2, рис. 3). Оставшуюся долину реки занимает цепочка прудов, отчетливо выраженная в продольном профиле в виде ступеней (рис. 2). При этом число прудов, судя по профилю, равно количеству ступеней (уступов), на исследуемом участке русла составляет 71, количество перегораживающих сооружений – 82. Таким образом, среднее расстояние между перегораживающими сооружениями равно 2,6 км.

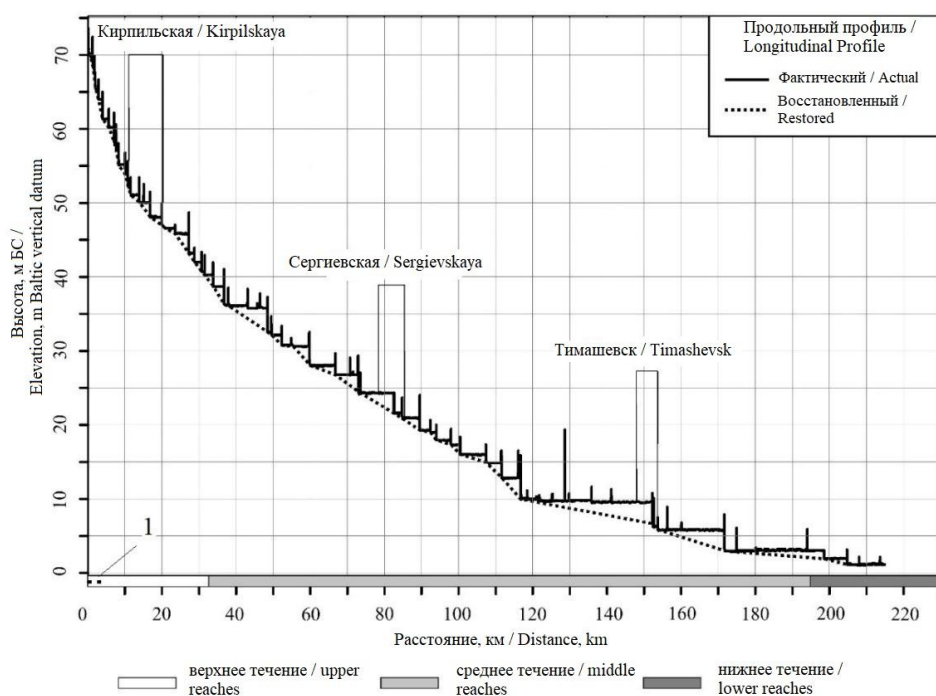


Рис. 2. Фактический и восстановленный продольные профили р. Кирпили.
1 – сухие участки русла /

Fig. 2. Actual and reconstructed longitudinal profile of the Kirpili River.
1 – dry sections of the riverbed

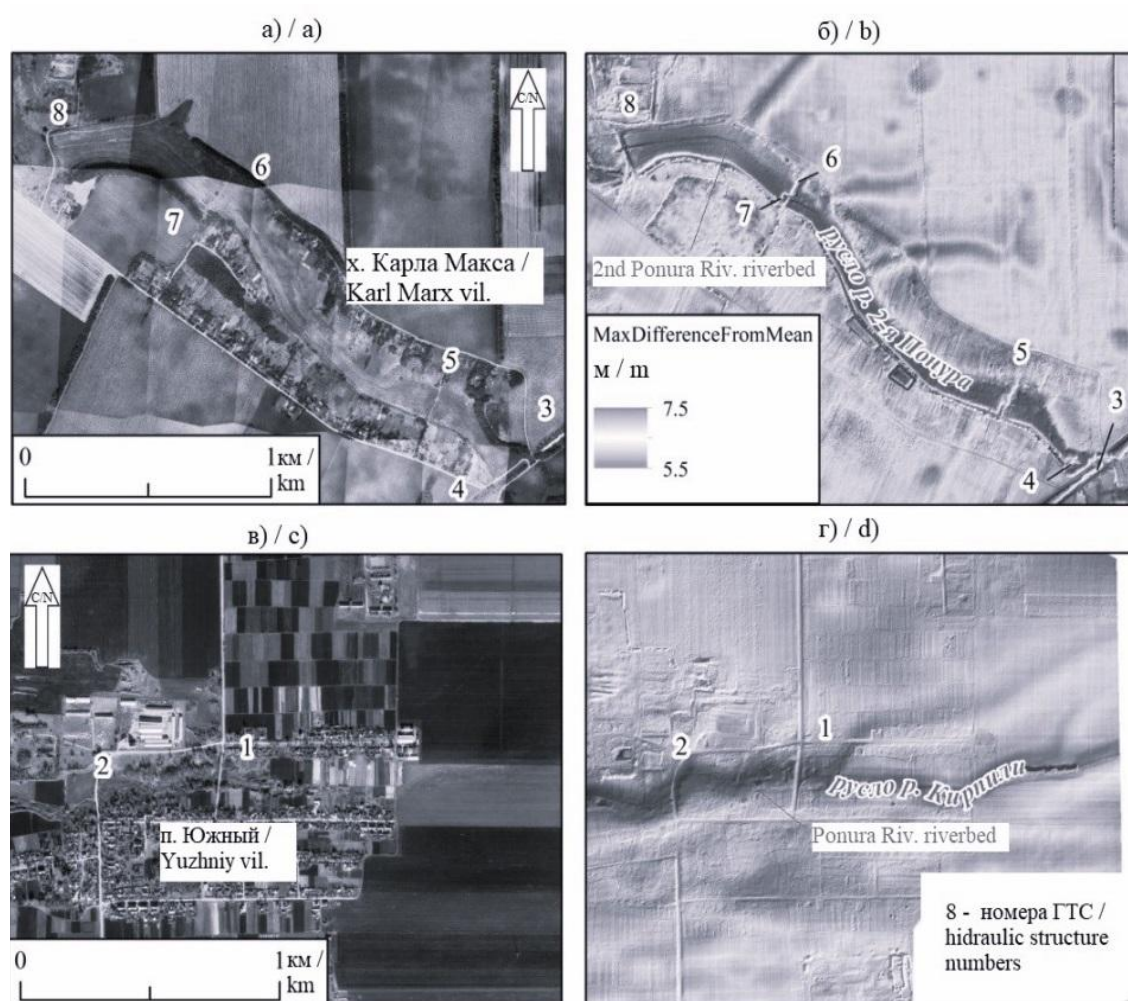


Рис. 3. Сухие участки русел Понуры (а, б) и Кирпили (в, г). Ортофотоплан 23.07.2019 (а). Снимок Maxar Technologies 26.11.2021 (б). Индекс MaxDifferenceFromMean по ЦМР (даты аэросъемки 23.07.2019 (б) и 11.08.2019 (г)) /

Fig. 3. Dry sections of the Ponury (a, b) and Kirpili (c, d) riverbeds. Orthophotomap 07/23/2019 (a). Maxar Technologies image 11/26/2021 (c). MaxDifferenceFromMean index based on DEM (aerial photography dates 07/23/2019 (b) and 08/11/2019 (d))

Фактическая геометрия уступообразного профиля (рис. 2) указывает на отсутствие значимого уклона водной поверхности у прудов, заключенных между ГТС; иначе говоря, течение, как проявление речных свойств и, одновременно, показатель линейных водно-эрозионных процессов, не выражено на всем протяжении русла с искусственным ступенчатым профилем. По данным продольного профиля рассчитаны отметки уреза воды у ГТС, величины подпора и площади прудов, которые внесены в созданную базу данных. Фрагмент базы данных представлен в таблице 2. Площади прудов изменяются в пределах 0,15–49,2 га. Общая площадь водоемов, созданных подпором от перегораживающих русло р. Кирпили ГТС, составляет 3861,6 га при средней площади пруда 55,1 га (табл. 3). Средняя величина подпора – 0,92 м, максимальная – 3,89 м, при этом зафиксировано 13 участков, где подпор равен 0 м, с суммарной площадью прудов 1351,6 га (35 % от общей площади прудов) в исследуемом русле Кирпили.

Таблица 2 / Table 2

**Характеристики водоподпорных гидротехнических сооружений
и образованных ими прудов в русле р. Кирпили (фрагмент базы данных) /
Characteristics of water-retaining hydraulic structures and ponds formed by them
in the bed of the river Kirpili (database fragment)**

Номер ГТС и пруда / Dam and pond number	Абсолютная высота, м / Absolute height, m	Дата съемки / Date of measurement	Величина подпора, м / Affluent value, m	Площадь пруда, га / Pond area, ha
4K	65.5	11.08.2019	-	4.27
5K	64.02		1.48	8.52
6K	61.35		2.67	0.76
7K	61.35		0	18.41
8K	60.23		1.12	14.95
9K	58.96		1.27	3.65
10K	57.79		1.17	5.73
11K	55.18		2.61	16.96
12K	53.88		1.3	5.55
13K	52.14		1.74	4.93
...	...	...	...	...
69K	9.51	22.07.2019	0.01	438.07
70K	6.87		2.64	4.89
71K	6.43		0.44	1.48
72K	6.29		0.14	9.10
73K	5.85		0.44	32.45
74K	5.74		0.11	386.94
75K	2.9		2.84	42.23
76K	2.9		0	61.97
77K	2.9		0	492.33
78K	2.9		0	432.04
80K	1.19		1.71	317.18

Таблица 3 / Table 3

**Обобщенные характеристики перегораживающих гидротехнических сооружений
и образованных ими прудов в руслах рек Кирпили и Понуры /
Generalized characteristics of the damming hydraulic structures and the ponds
formed by them in the beds of the Kirpili and Ponura rivers**

Количество ГТС, образующих пруды / Number of dams forming ponds	Характеристика / Characteristic	Величина подпора, м / Backup value, m	Площадь пруда, га / Pond area, ha
река Кирпили / Kirpili River			
71	Минимальная / Minimum	0	0.15
	Максимальная / Maximum	3.89	492.3
	Средняя / Average	0.92	55.1
	Сумма / Sum	-	3861.6

река Понура / Ponura River			
34	Минимальная / Minimum	0	0.81
	Максимальная / Maximum	3.22	99.8
	Средняя / Average	0.74	28.3
	Сумма / Sum	-	960.5

Восстановление условного естественного продольного профиля осуществлялось посредством его проведения через точки нижних бровок уступов. Как видим (рис. 2), восстановленный продольный профиль р. Кирпили имеет характерную вогнутую форму, относится к типу выработанных, близких к равновесному. Это указывает на сбалансированность эрозии и аккумуляции в период, предшествовавший массовому строительству плотин в русле Кирпили.

Продольный профиль р. Понуры построен на участке течения р. 2-я Понура ниже пересечения с автодорогой А-136 до впадения в основную реку и вниз до Понурского лимана. Последний представляет собой водоем, заросший густой водно-болотной растительностью, т.е. плавни. Длина профиля равна 78,8 км, падение – 53 м (рис. 4). Сухие участки русел в количестве 7 общей протяженностью до 10,0 км приурочены к участкам выше и ниже станицы Новотитаровской (рис. 2, 4).

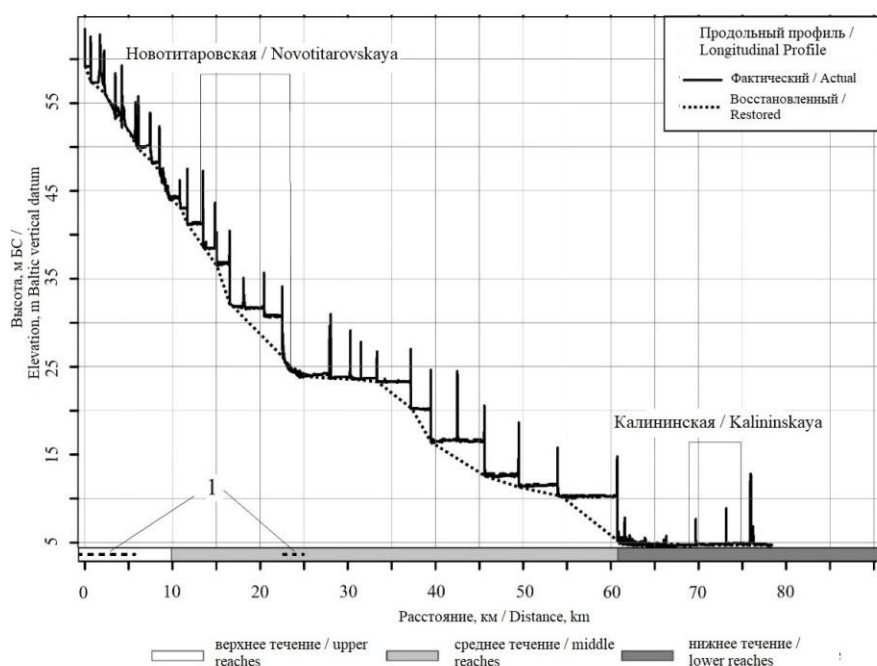


Рис. 4. Фактический и восстановленный продольные профили р. Понуры.

1 – сухие участки русла /

Fig. 4. Actual and reconstructed longitudinal profile of the Ponura River.

1 – dry sections of the riverbed

Русло р. Понуры занимает цепочка прудов, выраженная в продольном профиле уступами, заключенными между перегораживающими водоподпорными сооружениями. Таковых насчитывается 34. Общая площадь прудов на исследуемом участке составляет – 1088,6 га. Имеется 10 участков с величиной подпора менее 0,02 м,

занимающих суммарную площадь 256 га – 27 % от площади всех прудов. Среднее расстояние между ГТС здесь равно 2,3 км. Общая площадь водоемов, созданных подпором от ГТС, перегораживающих русло р. Понуры, на период съемки составляет 960,5 га при средней площади пруда 28,3 га в интервале от 0,81 до 99,8 га (табл. 3). Средняя величина подпора равна 0,74 м, максимальная – 3,22 м.

Перегораживающие водоподпорные сооружения оказывают определяющее влияние на жидкий сток и сток наносов, русловые процессы и другие свойства рек, коренным образом изменяя морфологическое строение русел и пойм, особенно на равнинных реках [Макаревич, Яротов, 2019]. Строительство плотины без водопропускного сооружения вызывает искусственное повышение базиса эрозии руслового потока. Расчленение единого русла на фрагменты, разделенные плотинами, приводит к формированию локальных профилей, отражающих принципиально иные русловые процессы, свойственные водным системам низшего порядка – малым водохранилищам (рис. 5).

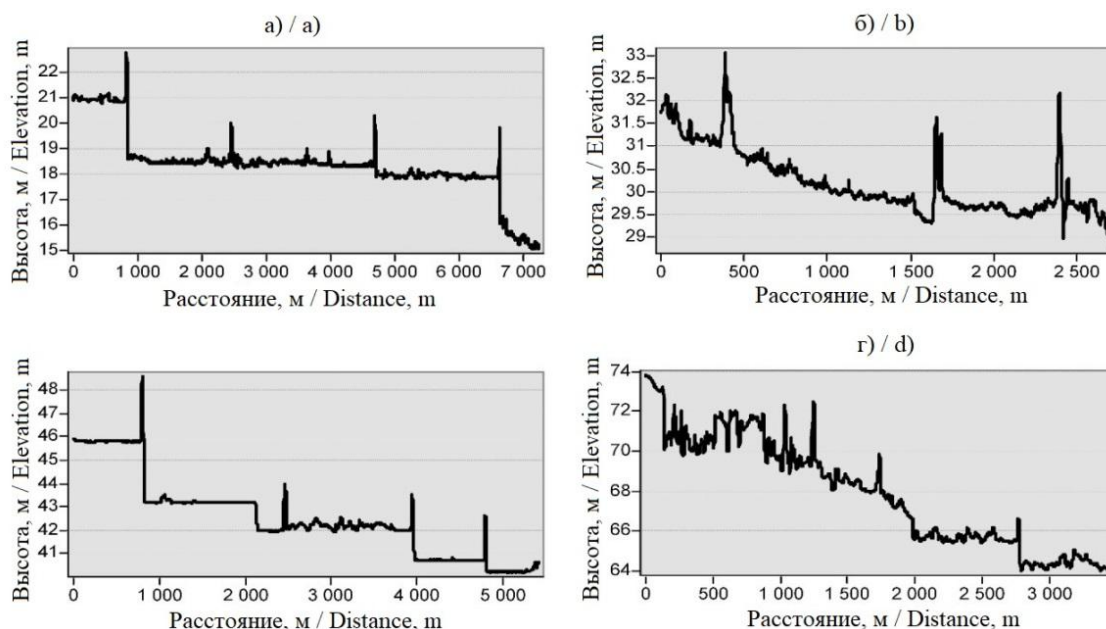


Рис. 5. Локальные продольные профили на участках течения рек Понуры (а, б) и Кирпили (в, г).
Профили б, г соответствуют верхним участкам русел

Fig. 5. Local longitudinal profiles in sections of the Ponura (a, b) and Kirpili (c, d) rivers.
Profiles b, d correspond to the upper sections of the riverbeds

При повышении базиса эрозии, недостатке предельного уклона на участке русла протяженностью 2–3 км, низкой эрозионной способности потока и ухудшении условий транспорта происходит критическое замедление движения донных наносов. При этом, судя по продольным профилям, донные наносы, способны постепенно сползать в сторону плотины, повсеместно образуя своеобразные уступы. В процессе деградации и снижения транспортной деятельности процессы эрозии и транзита затухают, процесс аккумуляции (заиления) становится преобладающим.

Признаком нарушения целостности речной системы является ее фрагментация при строительстве в русле техногенных барьеров. Фрагментация неизбежно приводит к 1) появлению внутри речной системы новых структур низшего порядка, 2) перестройке системы – переходу ко вторичной структуре, 3) перестройке гео-

морфологических процессов – от процессов в макросистеме (речная система) к доминирующим процессам в мезосистемах (пруды) с принципиально разными действующими вещественно-энергетическими механизмами. Наряду с перестройкой процессов, вызванных глубинной эрозией, отметим перестройку процессов плановой деформации русел. Такие русловые деформации возможны только во время высоких половодий. Рекам степной зоны Краснодарского края в условиях естественной эволюции свойственно свободное и ограниченное меандрирование (рис. 1) при отсутствии факторов, препятствующих перемещению русла в плане. В настоящий период меандрированию препятствуют радикально изменившиеся условия русловых процессов, ограничивающие размыв берегов и транспорт наносов вдоль русла.

В отношении геоморфологических процессов, участвующих в преобразовании анализируемых речных систем, уместно, на наш взгляд, понятие **неуправляемого геоморфологического техногенеза**. Текущую стадию техногенной деградации речных систем с гидрологических и геоморфологических позиций следует охарактеризовать как близкую к коллапсу. Коллапсом считается потеря экосистемой своих ключевых абиотических и биотических особенностей, неспособность поддерживать характерную биоту и трансформация в принципиально другой тип экосистемы [Keith et al., 2015]. По мнению [Newton, 2021], коллапс – это резкое изменение экосистемы, сопровождающееся потерей экосистемных функций с невозможностью самостоятельного восстановления в течение как минимум десяти лет.

Выводы

Продольные профили рек Кирпили и Понуры имеют ступенчато-прерванную форму, отражая чередование фрагментов русел, изолированных водоподпорными гидротехническими сооружениями. Высокая плотность ГТС на исследуемых реках (в среднем через 2,3–2,6 км) привела к критическому снижению энергии руслового потока и морфодинамической активности русловых процессов, включая глубинную и боковую эрозию, и, как следствие, исчезновению в гидрологическом понимании самих русел на значительном протяжении рек. Таким образом, речные системы трансформированы в совокупность малых пойменных водоемов, утратив свои экосистемные функции. Фактически такая трансформация означает переход к новой (вторичной) структурно-функциональной организации.

Предпосылками разрушения исследуемых речных систем послужили: уменьшение скорости водно-эрозионных процессов и объемов транспортной деятельности в масштабе речной системы, изменение интенсивности потоков вещества и энергии (на макроуровне – появление недостатка вещества и энергии в речной системе). Главный результат подобной техногенной трансформации рек – прекращение их функционирования как целостных речных систем, что, по существу, соответствует представлениям об исчезновении или коллапсе систем при отсутствии в настоящее время ресурсов для их дефрагментации и восстановления.

Литература

1. Башинский И.В., Кадетов Н.Г., Сенкевич В.А., Стойко Т.Г., Кацман Е.А. Осипов В.В. Трансформации экосистем пойменных водоемов в условиях современных природных и антропогенных изменений и возможные природоохранные стратегии. // Успехи современной биологии. – 2024. – Т. 144. № 1. – С. 80–96. DOI: 10.31857/S0042132424010063.
2. Векшина Т.В., Большаков В.А., Коринец Е.М. Экологические проблемы русел судоводных рек: учебное пособие. – СПб: Медиапайр, 2022. – 132 с.

3. Дрововозова Т.И., Паненко Н.Н. Экологическое состояние малых рек Ростовской области. // Экология и водное хозяйство. – 2019. – № 1(01). – С.1–17.
4. Косолапов А.Е., Дандара Н.Т., Капустин М.В. О разработке методологии подготовки комплексных планов восстановления и устойчивого функционирования бассейнов малых и средних рек. // Общество. Среда. Развитие. – 2017. – № 3. – С. 96–90.
5. Лурье П.М., Панов В.Д. Реки бассейна Азовского моря: Гидрография и режим стока. – Ростов-на-Дону: Донской издательский дом, 2021. – 672 с.
6. Макаревич А.А. Яротов А.Е. Речной сток и русловые процессы. – Минск: БГУ, 2019. – 115 с.
7. Никаноров А.М. Брызгало В.А., Решетняк О.С. Реки России в условиях чрезвычайных экологических ситуаций. Ростов-на-Дону: НОК, 2012. – 308 с.
8. Погорелов А.В., Липилин Д.А., Кузякина М.В. О техногенной деградации речных систем в Восточном Приазовье: гидрографический аспект. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 3. – С. 243–259. DOI: 10.46698/i4469-5379-6925-p.
9. Погорелов А.В., Липилин Д.А., Яроцкая Е.В. Геоинформационный анализ современных изменений гидрографических характеристик речной сети на Азово-Кубанской равнине (бассейн реки Ея). // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 161–179. DOI: 10.46698/VNC.2023.35.64.001.
10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 8. Северный Кавказ. / Под редакцией В.В. Куприянова. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 447 с.
11. Суздалева А.Л., Горюнова С.В. Общая схема развития процесса антропогенной деградации водных объектов. // Национальная ассоциация ученых (НАУ). – 2015. – № IV (9). Технические науки. – С. 92–95.
12. Суздалева А.Л., Горюнова С.В. Техногенез и деградация поверхностных водных объектов. – М.: ИД ЭНЕРГИЯ, 2014. – 456 с.
13. Суслов О.Н. Степные реки Краснодарского края. Краснодар: Куб ГАУ, 2015. – 256 с.
14. Федорова С.И., Чебанова Е.Ф., Артюхин Ю.В. Реакции продольных профилей и устьев рек бассейнов Азовского и Черного морей на изменчивость природных факторов и техногенное воздействие. // Эрозионные и русловые процессы. – Т. 5. М.: МГУ, 2010. – С. 387–406.
15. Downing J.A. Emerging global role of small lakes and ponds: little things mean a lot. // *Limnetica*. – 2010. – Vol. 29. No. 1. – pp. 9–24.
16. Dudgeon D., Arthington A.H., Gessner M.O. et al. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. // *Biological Reviews*. – 2006. – Vol. 81. Issue 2. – pp. 163–182. DOI: 10.1017/S1464793105006950.
17. Keith D.A., Rodriguez J.P., Brooks T.M. et al. The IUCN Red List of Ecosystems: motivations, challenges, and applications. // *Conservation Letters*. – 2015. – Vol. 8. Issue 3. – pp. 214–226. DOI: 10.1111/conl.12167.
18. Knighton D. *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*. Don Mills, Ontario, Oxford University Press, 1998. – 383 p.
19. Newton A.C. Strengthening the scientific basis of ecosystem collapse risk assessments. // *Land*. – 2021. – Vol. 10. – pp. 1252. DOI: 10.3390/land10111252.
20. Schumm S.A. *The Fluvial System*. New York. John Wiley and Sons, 1977. – 338 p.
21. Lindsay J.B., Cockburn J.M.H., Russell H.A.J. An integral image approach to performing multi-scale topographic position analysis. // *Geomorphology*. – 2015. – Vol. 245. – pp. 51–61. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.05.025.

References

1. Bashinsky I.V., Kadetov N.G., Senkevich V.A., Stoyko T.G., Katsman E.A. Osipov V.V. Transformations of floodplain water body ecosystems under conditions of modern natural and anthropogenic changes and possible conservation strategies. *Advances in Modern Biology*. 2024. Vol. 144. No. 1. pp. 80–96. DOI: 10.31857/S0042132424010063. (In Russ.)

2. Vekshina T.V., Bolshakov V.A., Korinets E.M. Environmental problems of shipping river beds: Study guide. Saint Petersburg. Mediapapir. 2022. 132 p. (In Russ.)
3. Drovovozova T.I., Panenko N.N. Ecological state of small rivers of the Rostov region. Ecology and Water Management. 2019. No. 1 (01). pp. 1–17. (In Russ.)
4. Kosolapov A.E., Dandara N.T., Kapustin M.V. On the development of a methodology for preparing comprehensive plans for the restoration and sustainable functioning of small and medium-sized river basins. Society. Environment. Development. 2017. No. 3. pp. 96–90. (In Russ.)
5. Lurye P.M., Panov V.D. Rivers of the Azov Sea basin: Hydrography and flow regime. Rostov-on-Don. Donskoy Publishing House. 2021. 672 p. (In Russ.)
6. Makarevich A.A., Yarotov A.E. River runoff and channel processes. Minsk. BSU. 2019. 115 p. (In Russ.)
7. Nikanorov A.M., Bryzgalo V.A., Reshetnyak O.S. Rivers of Russia in emergency environmental situations. Rostov-on-Don. NOC. 2012. 308 p. (In Russ.)
8. Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Kuzyakina M.V. On technogenic degradation of river systems in the Eastern Azov region: hydrographic aspect. Geology and Geophysics of Russian South. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 243–259. DOI: 10.46698/i4469-5379-6925-p. (In Russ.)
9. Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Yarotskaya E.V. Geoinformation analysis of modern changes in the hydrographic characteristics of the river network on the Azov-Kuban Plain (Eya River basin). Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 161–179. DOI: 10.46698/VNC.2023.35.64.001. (In Russ.)
10. Surface Water Resources of the USSR. Vol. 8. North Caucasus. Ed. V.V. Kupriyanov. Leningrad. Gidrometeoizdat. 1973. 447 p. (In Russ.)
11. Suzdaleva A.L., Goryunova S.V. General Scheme of Development of the Process of Anthropogenic Degradation of Water Bodies. National Association of Scientists (NAU). 2015. No. IV (9). Technical Sciences. pp. 92–95. (In Russ.)
12. Suzdaleva A.L., Goryunova S.V. Technogenesis and Degradation of Surface Water Bodies. Moscow. ID ENERGY. 2014. 456 p. (In Russ.)
13. Suslov O.N. Steppe rivers of Krasnodar Krai. Krasnodar. KubGAU. 2015. 256 p. (In Russ.)
14. Fedorova S.I., Chebanova E.F., Artyukhin Yu.V. Responses of longitudinal profiles and river mouths of the Azov and Black Sea basins to the variability of natural factors and anthropogenic impact. Erosion and channel processes. Vol. 5. Moscow. Moscow State University. 2010. pp. 387–406. (In Russ.)
15. Downing J.A. Emerging global role of small lakes and ponds: little things mean a lot. Limnetica. 2010 Vol. 29. No. 1. pp. 9–24.
16. Dudgeon D., Arthington A.H., Gessner M.O. et al. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. Biological Reviews. 2006. Vol. 81. Issue 2. pp. 163–182. DOI: 10.1017/S1464793105006950.
17. Keith D.A., Rodriguez J.P., Brooks T.M. et al. The IUCN Red List of Ecosystems: motivations, challenges, and applications. Conservation Letters. 2015. Vol. 8. Issue 3. pp. 214–226. DOI: 10.1111/conl.12167.
18. Knighton D. Fluvial Forms and Processes: A New Perspective. Don Mills, Ontario. Oxford University Press. 1998. 383 p.
19. Newton A.C. Strengthening the scientific basis of ecosystem collapse risk assessments. Land. 2021. Vol. 10. p. 1252. DOI: 10.3390/land10111252.
20. Schumm S.A. The Fluvial System. New York. John Wiley and Sons. 1977. 338 p.
21. Lindsay J.B., Cockburn J.M.H., Russell H.A.J. An integral image approach to performing multi-scale topographic position analysis. Geomorphology. 2015. Vol. 245. pp. 51–61. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.05.025.

УДК 553.982

DOI: 10.46698/VNC.2025.27.39.001

Оригинальная статья

Нижнемеловая залежь Старогрозненского нефтегазового месторождения как объект геологического моделирования

Т.Б. Эзирбаев 

Грозненский государственный нефтяной технический университет
им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, 100,
e-mail: timersno@mail.ru;

Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН,
Россия, 364051, г. Грозный, ул. В. Алиева, 21а

Статья поступила: 20.05.2025, доработана: 25.07.2025, принята к публикации: 30.07.2025

Резюме: Актуальность работы. Внедрение автоматизированных технологий и применение искусственного интеллекта при интерпретации геологических и петрофизических данных позволяет существенно повысить точность и надежность оценки запасов нефти и газа, а также оптимизировать процессы разведки и разработки месторождений. Создание трехмерных моделей на основе машинной интерпретации данных ГИС, лабораторных анализов фактического материала и сейсморазведки таких сложных геологических систем, как альб-апские отложения Терско-Сунженской области, характеризующихся высокой сложностью строения и неоднородностью свойств пород, позволяет более полно раскрыть их структурные и коллекторские особенности, что является весьма актуальным для региона с месторождениями на стадии истощения разведанных запасов. **Цель работы.** Заключается в разработке и внедрении автоматизированной, многофакторной методики интерпретации геолого-геофизической информации с использованием современных технологий машинного обучения, нейронных сетей и трехмерного моделирования, учитывая структурно-минералогическую неоднородность пород и их фильтрационно-емкостные свойства. **Методы исследований.** Комплексный подход, включающий интеграцию современных методов машинного обучения и геоинформационных технологий. Основные методы и подходы будут разделены на три этапа: 1. Оцифровка и обработка архивных данных по керну, ГИС, испытаниям скважин. Формирование единой цифровой базы данных. Выделение литотипов и их корреляция с данными ГИС. 2. Автоматизированная интерпретация ГИС и керна: использование технологии ESKS-TABC в ПО Gintel с применением нейросетевых алгоритмов для переинтерпретации данных. Применение машинного обучения для классификации коллекторов. 3. Методика геологического моделирования 3D: построение предварительных корреляционной и петрофизических моделей. **Результаты исследований.** Формирование Базы данных расширенной по составу интерпретированной геолого-геофизической информации, непрерывной по всему интервалу залегания пластов, определенных по технологии ESKS TABC. Сформированная БД станет основой для литолого-фациального геологического моделирования с применением технологий нейросетевого прогнозирования свойств в межскважинном пространстве.

Ключевые слова: петрофизика, гранулометрия, интерпретация, коллектор, месторождение, нефть, геологическая модель.

Для цитирования: Эзирбаев Т.Б. Нижнемеловая залежь Старогрозненского нефтегазового месторождения как объект геологического моделирования. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 239-254. DOI: 10.46698/VNC.2025.27.39.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.27.39.001

Original paper

The Lower Cretaceous reservoir of the Starogroznenkoye oil and gas field as an object of geological modeling

T.B. Ezirbaev 

Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov,
100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 364051, Russian Federation,
e-mail: timersno@mail.ru;

Kh.I. Ibragimov Complex Institute, Russian Academy of Sciences,
21a V. Alieva Str., Grozny 364051, Russian Federation

Received: 20.05.2025, revised: 25.07.2025, accepted: 30.07.2025

Abstract: Relevance. The implementation of automated technologies and artificial intelligence in the interpretation of geological and petrophysical data significantly improves the accuracy and reliability of oil and gas reserve estimates, as well as optimizes exploration and development processes. The creation of 3D models based on machine interpretation of well logging data, laboratory analysis of actual material, and seismic surveys of complex geological systems such as the Albian-Aptian deposits of the Terek-Sunzha region, characterized by highly complex structures and heterogeneous rock properties, allows for a more complete understanding of their structural and reservoir properties, which is highly relevant for a region with fields in the depletion stage of proven reserves. **Aim.** The study aims to develop and implement an automated, multifactor methodology for interpreting geological and geophysical information using modern machine learning, neural networks, and 3D modeling technologies, accounting for structural-mineralogical heterogeneity and filtration-capacity properties of rocks. **Methods.** A comprehensive approach integrating modern machine learning and geoinformation technologies. The methodology is divided into three stages: 1. Digitization and processing of archival core, well-logging, and well-testing data to create a unified digital database. Lithotype identification and correlation with well-logging data; 2. Automated well-logging and core interpretation using ESKS-TABC technology in Gintel software with neural network algorithms for data reinterpretation. Machine learning for reservoir classification; 3. 3D geological modeling: development of preliminary correlation and petrophysical models. **Results.** A comprehensive database integrating interpreted geological and geophysical data across entire reservoir intervals, processed using ESKS-TABC technology. This database will serve as the foundation for lithological-facial geological modeling, incorporating neural network technologies for interwell property prediction.

Keywords: petrophysics, granulometry, interpretation, reservoir, field, oil, geological model.

For Citation: Ezirbaev T.B. The Lower Cretaceous reservoir of the Starogroznenkoye oil and gas field as an object of geological modeling. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 239-254. DOI: 10.46698/VNC.2025.27.39.001

Введение

Методику компьютерного трехмерного геологического моделирования одним из первых предложил канадский ученый Саймон Хоулдинг в 1994 году. Этот метод дал начало выражению результатов геологических исследований в 3D-моделях, после чего технология трехмерного геологического моделирования стала стремительно развиваться и совершенствоваться. На сегодняшний день цифровое моделирова-

ние залежей и в целом месторождений получило широкое распространение в мире [Simon, 1994; Han et al., 2023].

Традиционно результаты геологических исследований отображаются на двухмерных аналоговых картах, таких как геолого-геофизические разрезы скважин, геологические профили, литологические колонки и структурные карты. Концепция трехмерных моделей основывается на проекции характеристик геологических тел, пластов, структур и рельефа на плоскость в трехмерном пространстве, при этом важно сохранить пространственную информацию без искажений. С применением технологии цифрового трехмерного моделирования и визуализации возможно создать и представить геологические тела и общую геологическую среду в трех измерениях по осям X, Y, Z. Поэтому технология трехмерного геологического моделирования вносит существенный вклад в теорию и практику методов получения, хранения, обработки и отображения геологических данных. Примером такой практики может служить работа “3D Geological Modeling and Its Application under Complex Geological Conditions” группы авторов из Китая [Генераленко и др., 2024].

Рабочий процесс создания 3D геологической модели включает в себя в основном структурное моделирование и моделирование свойств. Структурная модель включает в себя моделирование каркаса разломов, создание структурной модели выполняется в модуле, называемом «Дизайнер геологии». T-Navigator – это уникальная концепция разработанная в компании Рок Флоу Динамикс, в которой разломы в модели используются в качестве основы для создания трехмерной сетки, горизонтов, а также процессов моделирования зональности и слоистости [Игилманов, 2022]. Процесс моделирования свойств выполняется для определения фаций коллектора и петрофизических свойств (глинистость), насыщенности (нефть, газ), общей и эффективной пористости, извлеченных из имеющихся петрофизических анализов скважин в структурной модели. 3D геологическая модель помогает в разработке месторождения, оценивает углеводородный потенциал и оптимизирует добычу на изучаемой территории. Она также может быть использована для прогнозирования формы и размера коллектора, латеральной непрерывности и степени взаимосвязанности пласта, а также его внутренней неоднородности [Афанасьев, 2005; Abu-Hashish et al., 2019].

На этапе разработки геологических моделей месторождений полезных ископаемых формулируются ключевые геологические принципы моделирования, способствующие воспроизведению максимально реальной структуры геологического массива и динамики перемещения нефтегазовых флюидов в породах. Решение данной задачи основывается на глубоком и всестороннем анализе геофизических и петрофизических характеристик изучаемого комплекса пород. В этом контексте применяются обобщенные данные геолого-геофизической информации, а также осуществляется детальный анализ гранулометрических и петрофизических свойств пород, определенных в ходе лабораторных исследований образцов керна, отобранного еще во время бурения скважин. Эти аспекты способствуют более полному пониманию геологического строения и динамики флюидов, что, в свою очередь, позволяет оптимизировать процессы разработки месторождений [Mankhemthong et al., 2020; Sircar et al., 2021; Shao et al., 2021].

Главной особенностью изучаемого месторождения, которая придает актуальность теме исследования, видится то, что месторождение находится в постоянной и длительной эксплуатации и является одним из старейших промышленно разраба-

тываемых месторождений в мире, а первая промышленная нефть из нижнего мела изучаемой области была получена еще в начале 70-х годов XX века. А на 01.01.2019 государственным балансом запасов полезных ископаемых (нефть) в Чеченской Республике учтены 22 месторождения (18 нефтяных, 3 газонефтяных и 1 нефтегазоконденсатное) с разбуренными технологическими извлекаемыми запасами на разрабатываемых месторождениях кат. А+В1 – 9,000 млн т, на разведываемых кат. С1 – 1,467 млн т, всего (кат. А+В1+С1) – 10,467 млн т. На месторождениях, которые находятся в данный момент в разработке не обнаружено неразбуренных извлекаемых запасов нефти категории В2, в то время как разведанные запасы категории С2 составляют порядка 2,65 миллиона тонн. Промышленная нефтегазоносность была установлена в неогеновых и меловых отложениях. В распределенном фонде недр зарегистрированы запасы категории А+В1 в объеме 8,604 миллиона тонн, и категории С1 – около 0,17 миллиона тонн, что составляет 95,6% от общего объема разрабатываемых и 11,5% от разведанных запасов республики [Бачаева, Даукаев, 2024; Даукаев, Бачаева, 2021].

В таких условиях, для повышения эффективности разработки, пересчета и возможной переоценки запасов углеводородов необходимо детальное уточнение особенностей геологического строения исследуемого объекта, анализ неоднородности продуктивных отложений на различных месторождениях. И как итог – уточнение коллекторских свойств и запасов углеводородов путем создания цифровой модели изучаемого объекта по комплексу геолого-геофизических и петрофизических данных. Таким образом, впервые на нижнемеловых месторождениях Терско-Сунженской нефтегазоносной области (ТСНО) будет обоснована целесообразность применения аппарата трехмерного литолого-фациального геологического моделирования на поздней стадии разработки длительно разрабатываемых месторождений на примере нижнемеловых отложений Старогрозненского месторождения.

Цель исследования – на примере нижнемеловых отложений обосновать методику трехмерного литолого-фациального геологического моделирования для детализации особенностей геологического строения резервуаров, уточнения их добычных свойств и оценки их ресурсной базы на поздней стадии разработки. Задача – построение геологической модели нижнемеловой нефтегазовой залежи Старогрозненского месторождения на основе интеграции данных каротажа скважин, лабораторного анализа керна, сейсмических данных с данными других фондовых материалов для детальной характеристики коллекторов и разработки углеводородного потенциала указанного месторождения. Настоящая работа призвана стать первой статьей в серии публикаций на тему литолого-фациального геологического моделирования нижнемеловой, альб-аптской залежи ТСНО.

Методика исследований

В настоящее время, в геологической отрасли, при обработке и интерпретации данных каротажа скважин до сих пор используется технология «ручной» интерпретации – это ручная технология выделения пластов, снятия значений и экспертного определения литологии и насыщения (т.е. специалист сам принимает об этом решения).

Традиционная технология интерпретации берет свое начало с того времени, когда геофизические исследования регистрировались в аналоговой форме и интерпретация осуществлялась с помощью подручного математического инструмента. И как

следствие, параметры пласта определялись по наиболее простым уравнениям, по которым можно было осуществить расчёты вручную.

В 70-х годах прошлого века, начинают развиваться технологии автоматизированной интерпретации. Тогда ЭВМ были без графических мониторов и задание необходимо было формировать с помощью перфокарт. С появлением компьютеров с графическим пользовательским интерфейсом «ручная» традиционная технология была перенесена с бумажного планшета на компьютер. Но это только позволило решить проблему удобства интерпретации, но не совершенствования методик определения свойств горных пород и технологий интерпретации [Hu et al., 2025; Illarionov et al., 2022].

Такую технологию можно назвать компьютеризированной или полуавтоматической, но она не является автоматизированной.

В основе же изучения терригенных горных пород лежит изучение структурно-минералогического строения, которое служит инструментом для восстановления картины геологической неоднородности пород при построении литолого-фацальной геологической модели залежей углеводородов.

Данные ГИС отражают в интегрированном виде физические свойства пород, а через них петрофизические характеристики породы.

Главенствующую роль в информативности интерпретации данных ГИС играет петрофизическая модель.

Только при условии применения углубленной интерпретации данных ГИС возможно решение задачи подготовки информации для геологического моделирования.

Технология ESKS-TABC базируется на комбинации обобщенных петрофизических связей и элементов стохастического подхода, что отличает её от традиционных методик, использующих исключительно индивидуальные зависимости для конкретных стратиграфических объектов. В процессе разработки месторождений все перечисленные факторы изменяются, что приводит к изменению физических свойств пород. Данные каротажа в таком случае следует рассматривать как зафиксированные в момент проведения каротажа состояния физических свойств породы. Они несут в себе как статическую информацию о структурно-минералогическом строении пород, так и динамическую информацию – физические свойства пород, такие как K_p , $K_{в.св}$, $K_{пр}$, $K_{в}$ ($K_{нг}$) и другие.

Методика TABC, функционирующая под управлением экспертной системы ESKS, реализует песчано-алеврито-глинистую модель породы и учитывает эти сложные взаимосвязи. Её интеллектуальный алгоритм опирается на обобщенные петрофизические модели, разработанные с учётом закономерностей изменения адсорбционных, физических и фильтрационно-ёмкостных свойств горных пород. Таким образом, применение петрофизических моделей, обеспечивающих корректный учет адсорбционных явлений в формировании физических свойств пород, является необходимым условием достоверной интерпретации данных ГИС. Особенностью методики TABC является определение непрерывного по разрезу расширенного набора параметров, включающего ёмкость катионного обмена, долю связанной воды, трёхкомпонентную структурно-минералогическую модель, фазовые проницаемости, массовые доли обводнённости продукции, механические и скоростные свойства пород, давления и теоретические кривые каротажа.

Достоверность результатов подтверждается сопоставлением с данными исследований керна и совпадением фактических и теоретических кривых каротажа. Такой расширенный набор параметров позволяет формировать репрезентативные

выборки для машинного обучения, соответствующие требованиям полной представительности знаний об изучаемом объекте. В отличие от стандартного регрессионного анализа, применяемого в традиционных методиках, данный подход сохраняет всю полноту информации, что критически важно для построения точных прогнозных моделей в условиях изменяющихся свойств пород в процессе разработки месторождений.

Для создания трехмерной геологической модели аптского яруса Старогрозненского месторождения, являющегося на сегодняшний день основным продуктивным горизонтом этого месторождения, будут использованы результаты лабораторных исследований кернов, полученных в разный период исследования, разработки и эксплуатации залежи, также материалы углубленной интерпретации данных ГИС из 32 скважин, пробуренных на нижнемеловой горизонт по площади Старогрозненского месторождения и которые будут также обработаны и переинтерпретированы по технологии ESKS-TABC [Эзирбаев, 2021].

В настоящей же работе использованы результаты комплексной интерпретации данных ГИС по четырём скважинам Старогрозненского месторождения (рис. 4) в пределах группы альбских и аптских пластов, в задачи которой входили: анализ петрофизических закономерностей изменения коллекторских и фильтрационных свойств пород в разрезе; адаптация технологии. Комплексная интерпретация: определение объёмной структурно-минералогической модели породы; определение флюидальной модели; выделение коллекторов и определение их фильтрационно-емкостных свойств.

Исходными являются данные по скважинам объекта исследования в виде материалов геофизических исследований скважин (данных ГИС) в оцифрованном виде (las-файлы), данные по результатам исследования керна занесенных автором в файл Excel и в виде текстовых отчётов, инклинометрии и результатов испытаний.

Исследования керна, отобранного из скважин, выполнены по стандартным и расширенным методикам.

Обработка и комплексная интерпретация данных ГИС выполнена в программном обеспечении “Gintel” с применением технологий интерпретации ESKS-TABC [Афанасьев и др., 2009].

Для создания более полной и детализированной картины подтверждающей уникальные геологические особенности и петрофизические характеристики исследуемых отложений, а также для дополнительного обоснования достоверности и применимости методики могут быть привлечены данные исследований кернов и материалы ГИС соседних нефтегазоносных месторождений, таких как Хаян-Кортское, Эльдаровское, а также других месторождений нижнего мела.

Результаты и обсуждение

Старогрозненское газонефтяное месторождение находится в пределах Грозненского хребта в зоне передовых хребтов Восточного Предкавказья на территории Висаитовского (Старопромысловский) района г. Грозный Чеченской Республики. Исследования в области геологического строения Старогрозненского района начавшиеся вскоре после основания крепости привели к тому, что уже в 1893 году первая скважина № I-I из II пласта караганского горизонта с глубины 134 м дала первую промышленную нефть. На сегодняшний день, одним из основных объектов разработки месторождения является нижнемеловая залежь [Керимов и др., 2013].

В последние годы отдельные скважины начали обводняться. Выработанность альб-аптской залежи Старогрозненского месторождения по состоянию на 1.01.2008 г. по данным из справочника составила 72 % [Керимов и др., 2010]. На сегодняшний день по разным источникам выработанность нижнемеловой залежи Старогрозненского месторождения составляет 92–98 %.

Терригенные породы альб-аптского яруса мезозойских отложений ТСНО сложены типичными кварцево-полевошпатовыми образованиями, структурно-минералогический состав которых значительно изменчив как по глубине, так и по простиранию. Кривые на рисунке 1 построенные по результатам гранулометрического анализа кернов из изучаемого объекта в системе автоматизированной обработки и интерпретации данных геофизических исследований Gintel иллюстрируют распределение фракционного состава альб-аптских пород на Старогрозненском месторождении, всего анализу и машинной обработке подверглись более двухсот значений, определенных по керну. А объемное соотношение фракционного состава скелета пород в отложениях выполнено в виде треугольной диаграммы и представлено на рисунке 2.

По кривым рисунка 1 и расположению точек на треугольной диаграмме рисунка 2, можно отметить высокое содержание алевритовой фракции, которая перемешана с песчаной фракцией с глинами. Структурный каркас пород сложен песчаной, алевритовой и глинистой фракциями, связанными карбонатным цементом, обломками первичных пород, а также примесями других минералов. Основным породообразующим компонентом песчаников и алевритов является кварц.

Пористость альб-аптских коллекторов изучаемого объекта варьируется лишь в диапазоне 5–20%, проницаемость структурного каркаса – 1 мД, а Западносибирского нефтегазоносного региона – 10–40% и проницаемость до 1000 мД при средней глубине залегания 3000 м (рис. 3). Этот фактор является некоторой уникальностью изучаемых коллекторов, так как по результатам испытаний данные коллектора оказались высокодебитовыми [Смолянинова, 1977; Шнурман и др., 1989].

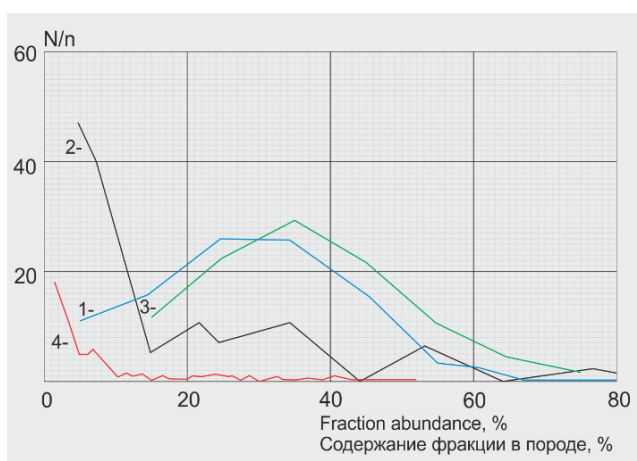


Рис. 1. Графики распределения фракций альб-аптских пород на Старогрозненском месторождении: 1 – алевритовая фракция, 2 – песчаная фракция, 3 – глинистая фракция, 4 – карбонатная фракция /

Fig. 1. Graphs of distribution of fractions of Alb-Aptian rocks at Starogroznenenskoye deposit:
1 – silt, 2 – sand, 3 – clay, 4 – carbonate

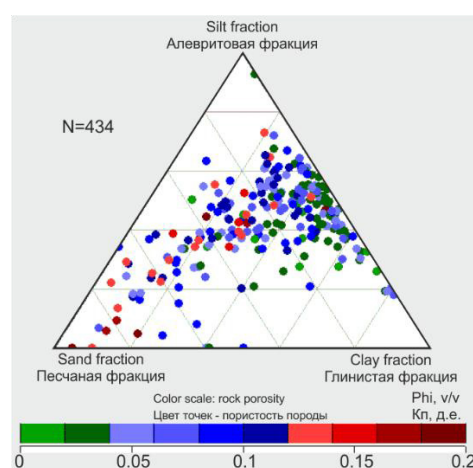


Рис. 2. Распределение фракционного состава альб-аптских пород, по результатам лабораторного анализа кернов /

Fig. 2. Distribution of fractional composition of Alb-Aptian rocks, based on the results of laboratory cores analysis

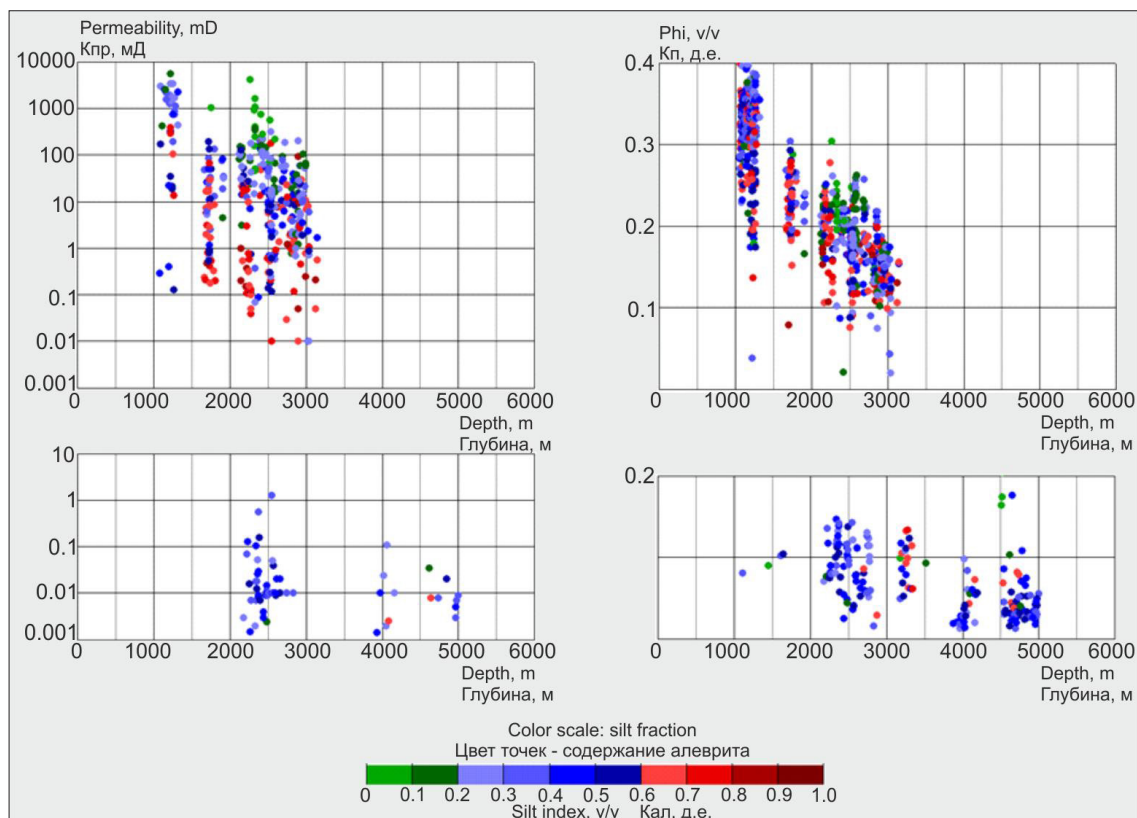


Рис. 3. Петрофизические закономерности глинистых алевролитов. Изменение K_p и K_{pr} как функция глубины залегания пород (Сравнение по месторождениям Западной Сибири и ТЧО) /
Fig. 3. Petrophysical patterns of clayey siltstones. Variation of porosity and permeability as a function of rock depth (Comparative for fields of Western Siberia and Tersko-Sunzhenskaya oil and gas bearing region)

Еще одной особенностью меловых отложений Терско-Сунженской нефтегазональной области по сравнению с аналогичными отложениями в других нефтегазональных районах, например, Западно-Сибирской нефтегазональной провинции, является то что, продуктивные отложения нижнего мела на месторождениях залегают в широком диапазоне глубин от 2150 до 5130 м, значительное изменение глубины залегания изучаемых пластов наблюдается даже от скважины к скважине в пределах одного месторождения. В некоторых случаях эти изменения достигают десятков, а иногда и сотен метров. На рисунке 4 показаны фрагменты литолого-геологических разрезов, разработанные на основании данных, полученных из четырех скважин, пробуренных в нижнем меле месторождения Старогрозненское. Структурно-минералогические модели, рассчитанные с использованием методики ESKS- TABC программного комплекса Gintel для каждой из исследуемых скважин, наглядно демонстрируют вариации фракционного состава пород в околоскважинной зоне. Эти модели позволяют глубже понять пространственное распределение и изменчивость литологических характеристик, что является ключевым аспектом для дальнейшего анализа геологических процессов и оценки ресурсного потенциала месторождения. И как видно из рисунка 4, кровля аптского продуктивного пласта в скважине №709 расположена ниже подошвы того же пласта в скважине №712 примерно на 50 метров. Это наглядно демонстрирует, насколько сложными геологическими условиями характеризуется залегание объекта исследования в данной работе.

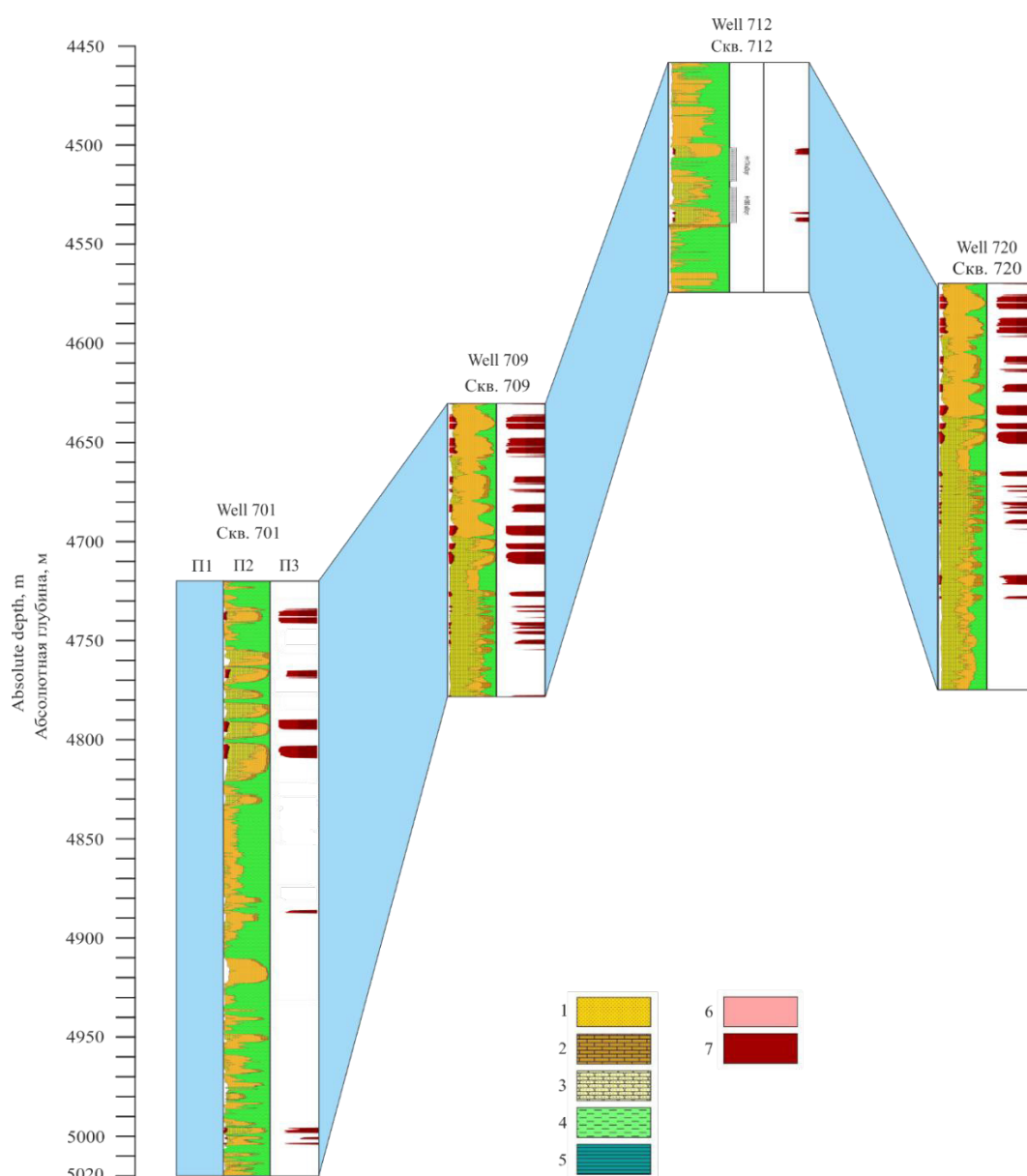


Рис. 4. Пример литологических разрезов нижнемеловых отложений Старогрозненского месторождения построенных на основе интерпретации данных ГИС нескольких скважин по методике ТАВС: П1 – поле границ пласта, П2 – объемная модель породы, П3 – флюидальная модель породы; 1 – алевроит, 2 – кальцит, 3 – песчаник, 4 – глина, 5 – плотный прослой, 6 – вода+нефть, 7 – нефть /

Fig. 4. Example of lithological sections of Lower Cretaceous sediments of Starogroznenskoye field constructed on the basis of interpretation of well logging data from several wells using TABC technique: П1 – reservoir boundary field, П2 – volumetric rock model, П3 – fluid rock model; 1 – siltstone, 2 – calcite, 3 – sandstone, 4 – clay, 5 – dense interlayer, 6 – water+oil, 7 – oil

Так как часть пор нефтегазосодержащей породы занята связанной и подвижной водой, а наличие и объем связанной воды зависит от всех составляющих структурного каркаса породы, очень важно учитывать данный параметр при интерпретации.

В технологии ТАВС для подсчета коэффициента связанной воды применяется модель, которая записывается формулой:

$$K_{в.св} = \frac{1}{1 + f_e \cdot c \cdot \frac{K_n \cdot K_e}{(Q_n + Q_0)}} + b \cdot K_{ал}, \quad (1)$$

где: $f_e = \sqrt{C_e} / (1 + \sqrt{C_e})$ – ионная активность минерализованного раствора внутри порового пространства, C_e , г/л;

Q_0 и c – эмпирические константы, определяемые при адаптации модели к реальным породам;

b – коэффициент, определяющий долю молекулярно связанной воды, обусловленную алевроитовым компонентом в скелете породы, объемное содержание которого равно $K_{ал}$.

В формуле (1) значение Q_n можно заменить на величину глинистости породы $K_{зл}$, подставляя значения в формулу $Q_n = K_{зл} \cdot Q_{зл} \cdot \delta_{зл}$.

На рисунке 5 приведена зависимость связанной воды от коэффициентов пористости и проницаемости, графики построены, а) по результатам лабораторного исследования кернового материала и б) – интерпретации данных комплекса ГИС из скважин изучаемого месторождения и для удобства анализа нанесены теоретические кривые величин заряда поровых каналов Q , от 0 до 0,3 моль/г. Расположение точек, между линиями заряда 0 и 0,3 моль/г соответствует глинам изучаемого разреза. Как видно, показания по данным ГИС (графики (б)) соответствуют показаниям керновых данных (графики (а)), что подтверждает применимость модели (1) для расчета остаточной водонасыщенности в альб-аптских коллекторах Старогрозненского месторождения. Для обработки и интерпретации данных ГИС таких пород традиционные технологии «двухкомпонентной» или еще более простой «однокомпонентной» моделей не подходят.

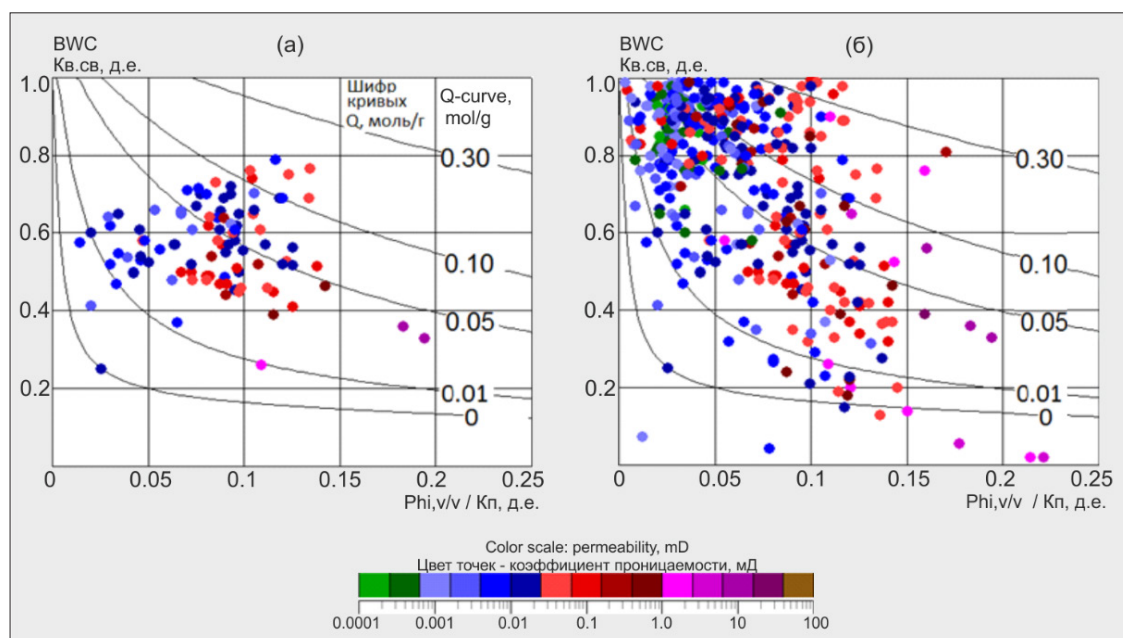


Рис. 5. Зависимость связанной воды от коэффициентов пористости и проницаемости альб-аптских отложений ТСНО рассчитанная по модели $K_{в.св}$: а) по данным лабораторного анализа керна, б) по результатам интерпретации данных ГИС /

Fig. 5. Dependence of bound water on porosity and permeability coefficients of the Alb-Aptian sediments of the Tersko-Sunzhenskaya oil-and-gas bearing area, calculated by model (1): а) based on laboratory core analysis data, б) based on the results of GIS data interpretation

Методика ТАВС же описывает песчано-алеврито-глинистую модель породы, в основе интеллектуального алгоритма которой лежат обобщенные петрофизические модели, разработанные на основе петрофизического моделирования и выявленных закономерностей изменения адсорбционных, физических и фильтрационно-ёмкостных свойств горных пород и зависимости их от структурно-минералогического строения и флюидального насыщения с учётом минерализации пластовой воды, температуры и давления в условиях залегания пород.

Выводы

Всего на нижнемеловые отложения по Старогрозненскому месторождению пробурено 30 скважин, 9 из которых поисковые, 4 – разведочные и 17 эксплуатационных скважин. На настоящий момент авторами исследования проведен ряд работ по изучаемой теме, это обзор, выборка, выкопировка и оцифровка некоторых аналоговых материалов. Это каротажные диаграммы из пяти скважин изучаемого месторождения и порядка пяти скважин прилегающих месторождений, сведения о проведенных в разные годы исследованиях из отчетов тематических партий и научных групп, компьютерная обработка результатов лабораторного анализа керна (см. рис. 1). Выполнена переинтерпретация всего комплекса оцифрованных геофизических данных с увязкой их с результатами лабораторного анализа кернов по указанной выше технологии и методике (рис. 2). В системе Gintel создана база данных по изучаемому району, которая включает в себя каротажные данные, данные обработки и интерпретации результатов каротажа, результаты лабораторного анализа керна, заключения по скважинам и имеющиеся сведения по испытаниям скважин. В дальнейшем база данных будет пополняться для использования по теме исследования. Также по результатам обработки имеющихся данных предложены и обоснованы петрофизические модели по керновым данным [Эзирбаев и др., 2024].

Для дальнейшего анализа и выявления петрофизических закономерностей, которые определяют коллекторские свойства и фильтрационные характеристики пород аптской залежи исследуемого месторождения, будет сформулирована задача по совершенствованию технологии изучения геологической неоднородности этих образований. В целях решения поставленных геологических задач предложенная методика интерпретации данных геофизических исследований позволит получить необходимую исходную информацию:

1. Проведение литолого-фациальной корреляции разрезов скважин.
2. Выделение в разрезе геологических тел с различным структурно-минералогическим составом, сформировавшихся в разных условиях осадконакопления.
3. Детализированное определение литологии пород с учетом их структурно-минералогических характеристик.
4. Выявление геологической неоднородности нефтенасыщенных толщ.
5. Оценка уровня нефтенасыщенности пород в разрезе.
6. Определение подсчетных параметров.
7. Уточнение геологических границ объектов разработки [Афанасьев и др., 2021].

Использование литолого-фациальной модели позволяет применить новый методический подход к исследованию пространственного распределения углеводородов: установить структуру запасов. Она в свою очередь дает представление о

качестве запасов и выражается в расчете объемов углеводородов в породах разного литологического состава и фильтрационно-емкостных свойств.

Трехмерная литолого-фациальная геологическая модель станет информационной базой при выделении слабопроницаемых нефтенасыщенных объектов альб-аптского яруса. В процессе трехмерного геологического моделирования альб-аптского яруса планируется реализовать следующие этапы:

1) Формирование структурного каркаса модели месторождения в трехмерной сетке с шагом по осям X и Y в диапазоне от 50 до 100 м, а также по оси глубины (Z) с шагом 0,5 м.

2) Создание 3D-кубов, отражающих компоненты структурно-минералогической модели пород, включая долю связанной воды и абсолютную проницаемость, на основе интерпретации данных геофизических исследований скважин.

3) Разработка 3D индексных параметров литологии и коллекторов с применением диагностических критериев и систем классификации терригенных пород, основанных на фракционном составе, литологии и пористости.

4) Проведение анализа литолого-фациального строения массива пород с выделением участков, состоящих из песчаников, алевролитов и глин.

5) Моделирование нефтегазонасыщения коллекторов на отдельных участках альб-аптской залежи нефти и газа, основываясь на оценках нефтегазонасыщенности, рассчитанных по данным геофизических исследований в пределах разрезов скважин, а также 3D-параметрах доли связанной воды (в зонах предельного газонасыщения) и с учетом 3D-параметров литологии и коллекторов, включая расчет 3D-индекса подвижных флюидов на основе обобщенных данных.

6) Определение структуры начальных геологических запасов – распределение объемов нефти в залежи с учетом изменений фракционного состава, а также емкостной и фильтрационной неоднородности пород в разрезе [Афанасьев и др., 2021; Thistiakov et al., 2024].

После цифровой обработки данных лабораторных исследований керна, их оцифровки, анализа и переинтерпретации с использованием ГИС по технологии ESKS-TABC «Gintel» было проведено детальное уточнение геологического строения нижнемеловых терригенных отложений Старогрозненского месторождения для четырех скважин. Это позволило определить ключевые особенности геологической структуры и сформулировать требования к уровню интерпретации данных ГИС и моделирования.

Анализ фильтрационно-емкостных характеристик выделенных геологических объектов дает возможность:

- выделять отдельные геологические тела;
- исследовать неоднородности в структуре и флюидных свойствах;
- оценивать запасы и выявлять новые перспективные зоны.

После масштабной оцифровки и обработки данных по всему месторождению и создания законченной модели залежи по предлагаемой методике и приемам, на основе полученных данных можно будет рекомендовать наиболее подходящие технологии дальнейшей разработки, перфорации и воздействия на пласты. Надежность этих решений напрямую зависит от детальности совместного анализа запасов и геолого-промысловых данных, накопленных в процессе разработки месторождения.

Разработанный алгоритм автоматизированной интерпретации с применением машинного обучения и нейронных сетей позволит широко использовать получен-

ные результаты, навыки для построения на ее основе трехмерной литолого-фациальной геологической модели.

Впервые для альб-аптских отложений Терско-Сунженской области будет предложено литолого-фациальное 3D-моделирование на базе комплексной методики, сочетающей машинное обучение, нейросетевые алгоритмы при переинтерпретации фондовых скважинных и полевых данных. Новизна заключается в создании алгоритмов, минимизирующих субъективность при интерпретации и обеспечивающих воспроизводимость результатов позволяющих создать объемную структурно-минералогическую и флюидальную модели пород.

Литература

1. Афанасьев В.С., Афанасьев С.В., Афанасьев А.В. и др. Методика автоматизированного восстановления свойств пород в терригенном разрезе по данным ГИС в системе Gintel (Методика ТАВС). – М: ООО «Геоинформационные технологии и системы», 2009. – 100 с.
2. Афанасьев В.С., Афанасьев С.В., Варягов С.А., Красовский А.В., Меньшиков С.Н. Литолого-фациальное геологическое моделирование на примере Медвежьего газоконденсатного месторождения. – Новосибирск: СО РАН, 2021. – 144 с.
3. Афанасьев С.В. Технология комплексной переинтерпретации данных геофизических исследований скважин при создании трехмерной геологической модели длительно разрабатываемой залежи. // Нефтяное хозяйство. – 2005. – № 2. – С. 12–17.
4. Бачаева Т.Х., Даукаев А.А. Минерально-сырьевая база, проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса Чеченской Республики. // Вестник КНИИ РАН. Серия: Естественные и технические науки. – 2024. – № 2(17). – С. 160–170. DOI: 10.34824/VKNIRAN.2024.17.2.013.
5. Генераленко О.С., Шелепов И.В., Ермакова О.Э., Моторин И.В., Воробьева Г.Н., Парамошина Д.Д. Интегрированный подход к построению геологических моделей на основе фациального анализа. // Георесурсы. – 2024. – Т. 26. № 3. – С. 33–42. DOI: 10.18599/grs.2024.3.5.
6. Даукаев А.А., Бачаева Т.Х. Геологоразведочные работы на нефть и газ на территории Чеченской Республики: состояние и перспективы развития. // Вестник КНИИ РАН. – 2021. – № 3(7). – С. 34–40. DOI: 10.34824/VKNIRAN.2021.7.3.004.
7. Игилманов Б.Б. Подсчет запасов углеводородов на основе 3д модели в симуляторе tНавигатор. Применение workflow для оптимизации работы. // Yessenov Science Journal. – 2022. – No. 2(43). – pp. 88–94. DOI: 10.56525/OAHL5595.
8. Керимов И.А., Борисенко З.Г., Даукаев А.А., Гайсумов М.Я., Абубакарова Э.А., Чимаева Х.Р. Геология нефтяных месторождений Терско-Сунженской нефтегазоносной области: справочник. Грозный: Академия наук Чеченской Республики, 2010. – 254 с.
9. Керимов И.А., Даукаев А.А., Бачаева Т.Х. Старогрозненское месторождение нефти и газа (к 120-летию начала освоения). // Вестник Академии наук Чеченской Республики. – 2013. – № 3(20). – С. 115–124.
10. Смольянинова К.И. Коллекторские особенности пород нижнего мела Терско-Сунженского нефтеносного района на глубинах свыше 3000 м. // Изучение коллекторов нефти и газа, залегающих на больших глубинах. Выпуск-124. – М.: Недра, 1977. – С. 130–132.
11. Шнурман Г.А., Демушкина Н.В., Терентьев В.Ю., Афанасьев В.С., Гаранин А.Б. Методика выделения и оценки альб-аптских терригенных коллекторов Терско-Сунженской антиклинальной зоны по данным ГИС. // Геология нефти и газа. – 1989. – № 1. – С. 40–43.
12. Эзирбаев Т.Б. Обзор технологий комплексной обработки переинтерпретации данных геофизических исследований скважин для детального расчленения разреза и переоценки запасов углеводородов. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 2. – С. 118–136. DOI: 10.46698/VNC.2021.40.15.009.

13. Эзирбаев Т.Б., Гацаева С.С.-А., Абдулшахидова Х.А. Анализ зависимости пористости нижнемеловых коллекторов Терско-Сунженской нефтегазоносной области от петрофизических параметров. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 194–206. DOI: 10.46698/VNC.2024.29.28.015.
14. Abu-Hashish M., Wanas H.A., Madian E. 3D geological modeling of the Upper Cretaceous reservoirs in GPT oil field, Abu Sennan area, Western Desert, Egypt. // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2019. – Vol. 10. Issue 3. – pp. 1–23. DOI: 10.1007/s13202-019-00780-9.
15. Han J.-X., Xue L., Wei Y.-Sh., Qi Y.-D., Wang J.-L., Liu Y.-T., Zhang Y.-Q. Physics-informed neural network-based petroleum reservoir simulation with sparse data using domain decomposition. // *Petroleum Science*. – 2023. – Vol. 20. Issue 6. – pp. 3450–3460. DOI: 10.1016/j.petsci.2023.10.019.
16. Hu Y., Xin X., Yu G., Deng W. Deep insight: an efficient hybrid model for oil well production forecasting using spatio-temporal convolutional networks and Kolmogorov–Arnold networks. // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. No. 8221. – pp 1–19. DOI: 10.1038/s41598-025-91412-2.
17. Illarionov E., Temirchev P., Voloskov D., Kostoev R., Simonov M., Pissarenko D., Orlov D., Koroteev D. End-to-end neural network approach to 3D reservoir simulation and adaptation. // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 208. Part A. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109332.
18. Mankhemthong N., Phanratana C., Udphuay S. Lithologic modeling using VES method for subsurface structure delineation with geological constraints, eastern margin of Chiang Mai Basin and southwestern margin of Mae On Depression, San Kamphaeng District, Chiang Mai Province, northern Thailand. // *Geosciences Journal*. – 2020. – Vol. 25. Issue 4. – pp. 479–494. DOI: 10.1007/s12303-020-0037-4.
19. Shao Y.-l., Zheng A.-l., He Y., Xiao K.-Y. 3D Geological modeling and Its application under complex geological conditions. // *Procedia Engineering*. – 2011. – Vol. 12. – pp. 41–46. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.05.008.
20. Simon W. Houlding geological interpretation and modeling. // *3D Geoscience Modeling*. – 1994. – pp. 113–129. DOI: 10.1007/978-3-642-79012-6_7.
21. Sircar A., Yadav K., Rayavarapu K., Bist N., Oza H. Application of machine learning and artificial intelligence in oil and gas industry. // *Petroleum Research*. – 2021. – Vol. 6. Issue 4. – pp. 379–391. DOI: 10.1016/j.ptlrs.2021.05.009.
22. Thistiakov A., Shvalyuk E., Okosun K., Spasennykh M., Stenin A. Advanced well logging interpretation for reliable electrotyping of low-permeable and low-resistivity formation. // *Georesources*. – 2024. – Vol. 26. Issue 4. – pp. 163–175. DOI: 10.18599/grs.2024.4.20.

References

1. Afanasiev V.S., Afanasyev S.V., Afanasyev A.V. et al. Methodology for automated restoration of rock properties in terrigenous sections based on GIS data in the Gintel system (TAVS methodology). Moscow. LLC Geoinformation Technologies and Systems. 2009. 100 p. (In Russ.)
2. Afanasyev V.S., Afanasyev S.V., Varyagov S.A., Krasovsky A.V., Menshikov S.N. Lithological and facies geological modeling using the example of the Medvezhye gas condensate field. Novosibirsk. Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. 2021. 144 p. (In Russ.)
3. Afanasyev S.V. Technology for comprehensive reinterpretation of geophysical well survey data when creating a three-dimensional geological model of a long-term developed deposit. *Oil Industry*. 2005. No. 2. pp. 12–17. (In Russ.)
4. Bachaeva T.Kh., Daukaev A.A. Mineral resource base, problems, and prospects for the development of the oil and gas complex of the Chechen Republic. *Vestnik of KNII RAS. Series: Natural and Technical Sciences*. 2024. No. 2(17). pp. 160–170. DOI: 10.34824/VKNIIRAN.2024.17.2.013. (In Russ.)

5. Generalenko O.S., Shelepov I.V., Ermakova O.E., Motorin I.V., Vorobyova G.N., Paramoshina D.D. An integrated approach to building geological models based on facies analysis. *Georesources*. 2024. Vol. 26. No. 3. pp. 33–42. DOI: 10.18599/grs.2024.3.5. (In Russ.)
6. Daukayev A.A., Bachaeva T.Kh. Geological exploration for oil and gas in the Chechen Republic: status and prospects for development. *Vestnik of KNII RAS*. 2021. No. 3(7). pp. 34–40. DOI: 10.34824/VKNIIRAN.2021.7.3.004. (In Russ.)
7. Igilmanov B.B. Calculation of hydrocarbon reserves based on a 3D model in the tNavigator simulator. Application of workflow for optimization. *Yessenov Science Journal*. 2022. Vol. 43(2). pp. 88–94. DOI: 10.56525/OAHL5595. (In Russ.)
8. Kerimov I.A., Borisenko Z.G., Daukaev A.A., Gaisumov M.Ya., Abubakarova E.A., Chimaeva H.R. *Geology of oil fields in the Tersko-Sunzha oil and gas region: reference book*. Grozny: Academy of Sciences of the Chechen Republic. 2010. 254 p. (In Russ.)
9. Kerimov I.A., Daukaev A.A., Bachaeva T.Kh. The Starogrozny oil and gas field (on the 120th anniversary of its development). *Bulletin of the Academy of Sciences of the Chechen Republic*. 2013. No. 3(20). pp. 115–124. (In Russ.)
10. Smolyaninova K.I. Reservoir characteristics of Lower Cretaceous rocks in the Tersko-Sunzha oil-bearing region at depths of over 3000 m. *Study of Oil and Gas Reservoirs at Great Depths*. Issue 124. Moscow. Nedra. 1977. pp. 130–132. (In Russ.)
11. Shnurman G.A., Demushkina N.V., Terentyev V.Yu., Afanasyev V.S., Garanin A.B. Methodology for the identification and evaluation of Albion-Aptian terrigenous reservoirs in the Tersko-Sunzha anticline zone based on GIS data. *Russian Oil and Gas Geology*. 1989. No. 1. pp. 40–43. (In Russ.)
12. Ezirbaev T.B., Gatsaeva S.S.-A., Abdulshahidova H.A. Analysis of dependence of porosity of Lower Cretaceous reservoirs of the Tersko-Sunzhenskaya oil and gas bearing area on petrophysical parameters. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 194–206. DOI: 10.46698/VNC.2024.29.28.015. (In Russ.)
13. Ezirbaev T.B. Review of technologies for integrated processing of reinterpretation of well logging data for detailed dissection of the section and revaluation of hydrocarbon reserves. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 118–136. DOI: 10.46698/VNC.2021.40.15.009. (In Russ.)
14. Abu-Hashish M., Wanas H.A., Madian E. 3D geological modeling of the Upper Cretaceous reservoirs in GPT oil field, Abu Sennan area, Western Desert, Egypt. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2019. Vol. 10. Issue 3. pp. 1–23. DOI: 10.1007/s13202-019-00780-9.
15. Han J.-X., Xue L., Wei Y.-Sh., Qi Y.-D., Wang J.-L., Liu Y.-T., Zhang Y.-Q. Physics-informed neural network-based petroleum reservoir simulation with sparse data using domain decomposition. *Petroleum Science*. 2023. Vol. 20. Issue 6. pp. 3450–3460. DOI: 10.1016/j.petsci.2023.10.019.
16. Hu Y., Xin X., Yu G., Deng W. Deep insight: an efficient hybrid model for oil well production forecasting using spatio-temporal convolutional networks and Kolmogorov–Arnold networks. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. No. 8221. pp. 1–19. DOI: 10.1038/s41598-025-91412-2.
17. Illarionov E., Temirchev P., Voloskov D., Kostoev R., Simonov M., Pissarenko D., Orlov D., Koroteev D. End-to-end neural network approach to 3D reservoir simulation and adaptation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. Vol. 208. Part A. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109332.
18. Mankhemthong N., Phanratana C., Udphuay S. Lithologic modeling using VES method for subsurface structure delineation with geological constraints, eastern margin of Chiang Mai Basin and southwestern margin of Mae On Depression, San Kamphaeng District, Chiang Mai Province, northern Thailand. *Geosciences Journal*. 2020. Vol. 25. Issue 4. pp. 479–494. DOI: 10.1007/s12303-020-0037-4.

19. Shao Y.-l., Zheng A.-l., He Y., Xiao K.-Y. 3D Geological modeling and Its application under complex geological conditions. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 12. pp. 41–46. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.05.008.
20. Simon W. Houlding geological interpretation and modeling. *3D Geoscience Modeling*. 1994. pp. 113–129. DOI: 10.1007/978-3-642-79012-6_7.
21. Sircar A., Yadav K., Rayavarapu K., Bist N., Oza H. Application of machine learning and artificial intelligence in oil and gas industry. *Petroleum Research*. 2021. Vol. 6. Issue 4. pp. 379–391. DOI: 10.1016/j.ptlrs.2021.05.009.
22. Thistiakov A., Shvalyuk E., Okosun K., Spasennykh M., Stenin A. Advanced well logging interpretation for reliable electrotyping of low-permeable and low-resistivity formation. *Georesources*. 2024. Vol. 26. Issue 4. pp. 163–175. DOI: 10.18599/grs.2024.4.20.

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 $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, $\sin$, $\cos$, $\min$, $\max$ и т.п. набираются прямым шрифтом. Символ не должен сливаться с надсимвольным элементом в химических элементах (H_2O) и единицах измерений (MBT/cm^2) – прямым (обычным) шрифтом. Не следует смешивать одинаковые по написанию буквы латинского, греческого и русского алфавитов, использовать собственные макросы. Буквы I и J, v и u, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (ноль) должны различаться по начертанию. Между цифровым значением величины и ее размерностью следует ставить знак неразрывного пробела. Переносы в словах либо не употреблять. Не использовать в тексте для форматирования знаки пробела. Формулы создаются с помощью встроенного редактора формул Microsoft Equation с нумерацией в круглых скобках – (2), выравниваются по правому краю, расшифровка всех обозначений (букв) в формулах дается в порядке упоминания в формуле. Во избежание недоразумений и ошибок редакция рекомендует авторам использовать в формулах буквы латинского, греческого и других (не русских) алфавитов; при наборе формул необходимо соблюдать размеры по умолчанию. Большие формулы необходимо разбивать на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при использовании формульного редактора каждая строка – отдельный объект). Нумерацию и по возможности знаки препинания следует ставить отдельно от формул обычным текстом. Таблицы, рисунки, фотографии размещаются внутри текста и имеют сквозную нумерацию по статье и собственные заголовки. Названия всех рисунков, фотографий и таблиц приводятся на русском языке 11 кеглем, курсивом. Все надписи на русском языке на рисунках и в таблицах дублируются на английский. Нумерация обозначений на рисунках дается по порядку номеров по часовой стрелке или сверху вниз. Рисунки необходимо по возможности выполнять в векторном формате, желательно в программе Corel Draw или аналогах по следующим правилам: ширина рисунка не более 16,5 см; толщина линий: основных – 1 пт, вспомогательных – 0,5 пт; для обозначений в поле рисунка использовать шрифт Times New Roman размером – 9 пт. Векторные рисунки записываются в отдельные файлы документов. Фотоснимки должны быть контрастными и выполненными на матовой бумаге. Отсканированные фотографии записываются в файлы в формате TIFF, JPEG. Сканировать изображение следует с разрешением 300 dpi для контрастных черно-белых рисунков и 600 dpi – для полутонных. Цветные иллюстрации допускаются по согласованию с редакцией. Обозначения, термины, иллюстративный материал, список литературы должны соответствовать действующим ГОСТам.

Перечень литературных источников приводится общим списком в конце статьи (Harvard Style). Список составляется по алфавиту, сначала следуют источники на русском, затем – на английском. Литература должна быть оформлена согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008. Отсылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках в строку с текстом документа. Если ссылку приводят на документ, созданный одним, двумя или тремя авторами в отсылке указывают фамилию первого автора и сокращение «и др.» («et al.» для документов, на языках, применяющих латинскую графику); если авторы не указаны – указывают название документа; далее указывают год издания и при необходимости сведения дополняют указанием страниц. Сведения в отсылке разделяют запятой. Если отсылка содержит сведения о нескольких ссылках, группы сведений разделяют знаком точка с запятой. В отсылке допускается сокращать длинные заглавия, обозначая опускаемые слова многоточием с пробелом до и после этого предписанного знака.

Адрес редакции:

Россия, РСО-Алания, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, Геофизический институт ВНИЦ РАН, Редакция журнала «Геология и геофизика Юга России». Тел: 8 (8672) 76-19-28; факс: 8 (8672) 76-40-56, e-mail: southgeo@mail.ru

INFORMATION FOR AUTHORS

The journal «Geology and Geophysics of Russian South» publishes original articles of theoretical and methodological nature on geology, geophysics and geochemistry, the results of studying the composition and structure of the Earth's crust and mantle, the formation processes and the general patterns of mineral resources, geophysical methods for their detection. The subject of the journal corresponds to the current nomenclature areas of knowledge of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation: 1.6.1 General and regional geology. Geotectonics and geodynamics; 1.6.4 Mineralogy, crystallography. Geochemistry, geochemical methods of prospecting for minerals; 1.6.6 Hydrogeology; 1.6.9 Geophysics; 1.6.10 Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny; 1.6.11 Geology, prospecting, exploration and exploitation of oil and gas fields; 1.6.12 Physical geography and biogeography, soil geography and landscape geochemistry; 1.6.20 Geoinformatics, cartography; 1.6.21 Geoecology; 2.8.6 Geomechanics, rock destruction, mine aerogas dynamics and mining thermal physics; 2.8.8 Geotechnology, mining machines and related scientific directions.

For works of a regional nature, preference is given to articles that reveal the various issues of the geological structure of the South of Russia and adjacent territories.

According to the gradation of Sciences accepted in the international citation systems Scopus and Web of Science articles for publication in the journal “Geology and Geophysics of the South of Russia” are accepted by the following branches and groups of Sciences:

1. Earth and Planetary Sciences;
2. Environmental Science.

The journal «Geology and Geophysics of Russian South» publishes:

– articles interpreting the new scientific research results of volume not more than 10 typewritten pages including illustrations and tables;

- brief messages containing information on the important results of the preliminary research of volume 3-5 pages (these materials can be used in the full article text);
- reviews of the typewritten articles on the actual problems on current geological, geophysical and environmental problems of the South of Russia and adjacent territories, volume 20-25 pages by the editor's order.

All papers must correspond to the journal theme. The presented manuscripts pass the preliminary and total reading stages and if necessary are sent back to the authors for the correction and finishing. The manuscripts are published in Russian and in English, the abstracts in Russian and in English as well. The journal publishes only the original articles. The author is fully responsible for the requirement. The manuscripts are not returned to the authors in case of being rejected in publication. The editor also does not return the materials sent. The editor has a right to make reductions and corrections of the article text. All corrections in the text and figures can be done by the authors only at the stage of the typesetting preparations. The infringement of the manuscript submission guidelines will lead to the article rejection. The publication is free of charge for authors of papers written by request of the publisher, and for graduate students. Reprinting is allowed only with the editorship permission with the obligatory references to the journal «Geology and Geophysics of Russian South».

Instructions for the authors

Acceptance of materials for consideration is carried out through the electronic service <https://www.geosouth.ru> or by mail to the Publisher address: 93a, Markova Street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal «Geology and Geophysics of Russian South».

The following materials should be presented:

- an article (structure and rules see below),
- a separate sheet with the information about the authors: surname, name, patronymic name, scientific degree, rank, a name of the organization, office and home address and telephone number, e-mail (if exists) and the reference to the author to contact with;
- a confirmation from the organization if the presented materials are the result of the work carried out in that organization; the journal heading (section) should be pointed out in the confirmation;
- an expert conclusion or any other document allowing the publication in the open press confirmed by the organization head and proved with the stamped seal; the expert conclusion is presented only by the authors from Russia.

If materials are submitted by electronic service, paper copies of the manuscript are not required to be submitted to the editorial office. When registering online, you must follow the step-by-step instructions for uploading files. When sending materials by regular mail, you must attach two paper copies of the article, signed by all authors. Text prepared in accordance with the general technical requirements is printed on one side of an A4 sheet. An annotation with the title, authors and their affiliation given at the beginning is printed on a separate sheet. Signatures to the figures are also provided separately. Each table and figure should be printed on a separate sheet. At the bottom of the page with an illustration, you must specify the number of the picture. It is also necessary to attach an electronic version on any portable storage device or, in agreement with the editors, send the relevant materials by e-mail.

The article lay-out rules (submission guidelines)

The following information should be pointed out on the first page: universal decimal classification, the article heading (title) in Russian (Sentence Case, without quotation marks, without division of a word, without a full stop at the end, underlining isn't used), point 20 semi bold, centre aligning; the authors surnames (point 14 semi bold type, the right-edge aligning), the organization name, post address, town, country and e-mail of corresponding author.

The abstract should be 250-300 words without formulas and literature references. In case a manuscript is presented in Russian, the abstract should be repeated in English with the article heading (title), surnames and names in this language. In case a manuscript is presented in English, the Russian variant must be supplied. The abstracts are typed in Times New Roman (12 point) in one file in the following order: the article heading (title), the authors, the name of the organization, the abstract text in Russian with the further information in 2 lines in the same sequence in English. The abstracts are also published in the journal site (in Russian and in English). Keywords (5-8) that reflect the theme of the article must be specified at the end of the abstract.

The article text is typed in Times New Roman (14 pt) through an ordinary interval aligning along the format. A subtitle is typed in italics, aligning along the left edge. The common terms, measurement units and conventional symbols similar to the whole article are used. The decoding of all symbols is given for the first text use. The Latin alphabet letters are typed in the italics while the Greek letters in the straight type. The mathematical symbols $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, $\cos$, $\sin$, $\min$, $\max$, etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements (H_2O) and measurement units (MW/cm^2) and must be of the straight (ordinary) type. One shouldn't mix similar written letters of the Latin, Greek and Russian alphabets and should use the proper macros. The letters I and J, v and υ , 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
(№32. 2025 г. Том 15)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 26.09.2025 г. Дата фактического выхода 30.09.2025 г.

Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.

Гарнитура «Times». Усл. печ. лист 30,45.

Тираж 100 экз. Заказ № 81.

Свободная цена.

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-72125 от 29 декабря 2017 г.

Издатель:

**Геофизический институт – филиал ФГБУН Федерального научного центра
"Владикавказский научный центр Российской академии наук"**

Адрес издателя и редакции:

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

тел. 8 (8672) 764084; факс 8(8672) 764056

e-mail: southgeo@mail.ru

<http://geosouth.ru>

Отпечатано ИП Цопановой А.Ю.

362002, г. Владикавказ, пер. Павловский, 3